

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HEC – HMS PARA LA SIMULACIÓN DEL TRANSITO DE AVENIDAS EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA CON ANTECEDENTES ASOCIADOS A FENOMENOS DE INUNDACIÓN

VALIDATION AND CALIBRATION OF THE HEC - HMS MODEL FOR THE SIMULATION OF THE TRANSIT OF AVENUES IN A HYDROGRAPHIC BASIN WITH BACKGROUND ASSOCIATED WITH FLOOD PHENOMENA

Henry Fabián Castillo Sarmiento

Ingeniero Ambiental, Estudiante de la Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos
Naturales

Bogotá D.C, Colombia.

U2700948@unimilitar.edu.co

Artículo de Investigación

DIRECTOR

Ph.D. Ximena Lucía Pedraza Nájjar

Doctora en Administración – Universidad de Celaya (México)

Magíster en Calidad y Gestión Integral – Universidad Santo Tomás e Icontec

Especialista en gestión de la producción, la calidad y la tecnología - Universidad Politécnica
de Madrid (España)

Especialista en gerencia de procesos, calidad e innovación – Universidad EAN (Bogotá D.C.)

Microbióloga Industrial – Pontifica Universidad Javeriana

Auditor de certificación: sistemas de gestión y de producto

Gestora Especialización en Gerencia de la Calidad - Universidad Militar Nueva Granada

ximena.pedraza@unimilitar.edu.co; gerencia.calidad@unimilitar.edu.co



La U
acreditada
para todos

**ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NOVIEMBRE DE 2019

VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HEC – HMS PARA LA SIMULACIÓN DEL TRANSITO DE AVENIDAS EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA CON ANTECEDENTES ASOCIADOS A FENOMENOS DE INUNDACIÓN

VALIDATION AND CALIBRATION OF THE HEC - HMS MODEL FOR THE SIMULATION OF THE TRANSIT OF AVENUES IN A HYDROGRAPHIC BASIN WITH BACKGROUND ASSOCIATED WITH FLOOD PHENOMENA

Henry Fabián Castillo Sarmiento

Ingeniero Ambiental, Estudiante de la Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales

Bogotá D.C, Colombia.

U2700948@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El análisis hidrológico posee entre otras condiciones el punto de partida de cualquier desarrollo hidráulico; obras para la conducción del recurso hídrico o la evaluación de amenazas por inundación en un territorio son algunas de esas actividades. La subcuenca del Río Apulo en los últimos años se ha visto afectada por fenómenos de inundación en los que los procesos de cambio de uso del suelo son la principal fuente de generación de las crecientes a lo largo de la subcuenca. La simulación hidrológica juega un papel importante para determinar los objetivos y criterios de la planificación en un territorio con el fin de reducir las amenazas asociadas a los procesos de lluvia - escorrentía en la comunidad. El software HEC – HMS y sus procesos de calibración y validación son el punto de inflexión de cualquier simulación hidrológica y su calidad y nivel de incertidumbre están determinadas en estas dos actividades que si bien el software no refiere como criterios básicos, si son determinantes para obtener los hidrogramas de salida de una manera confiable los cuales fortalecen los procesos de manejo de una cuenca hidrográfica y por supuesto la toma de decisiones en el territorio. Los procesos de calibración y validación se centraran en los hietogramas de precipitación obtenidos a través de las isoyetas generadas de la precipitación máxima en 24 horas de las estaciones operadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) de la zona del proyecto; adicionalmente la información básica asociada a la hidrografía de la subcuenca será obtenida mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) Arc-GIS10.3 y su extensión, HEC - GeoHMS.

Palabras clave: Simulación Hidrológica, calibración, validación, HEC – HMS, Arc-GIS, HEC – GeoHMS.

ABSTRACT

Hydrological analysis has among other conditions the starting point of any hydraulic development; Works for the conduction of water resources or the evaluation of flood threats in a territory are some of these activities. The sub-basin of the Apulo River in recent years has been affected by flood phenomena in which the processes of land use change are the main source of generation of the floods throughout the sub-basin. Hydrological simulation plays an important role in determining the objectives and planning criteria in a territory with the fin of reducing the threats associated with rain processes - runoff in the community. The HEC - HMS software and its calibration and validation processes are the turning point of any hydrological simulation and its quality and level of uncertainty are determined in these two activities that although the software is not related as basic criteria, if they are determinants for Obtain the output hydrographs in a reliable way which strengthen the management processes of a river basin and of course the decision making in the territory. The calibration and validation processes will focus on modified precipitation hietograms through the isoyetas generated from the maximum 24-hour precipitation of the stations operated by the Regional Autonomous Corporation of Cundinamarca (CAR) in the project area; Additionally, the basic information associated with the hydrography of the sub-basin will be obtained through the Arc-GIS10.3 Geographic Information System (GIS) and its extension, HEC - GeoHMS.

Keywords: Hydrological Simulation, calibration, validation, HEC - HMS, Arc-GIS, HEC - GeoHMS.

INTRODUCCIÓN

Comprender el recurso hídrico es un enfoque integrado en el que se incluyen todos y cada uno de los componentes hidrológicos y sus relaciones intrínsecas, el cuantificar los componentes hidrológicos son un factor determinante en la planificación del recurso hídrico. Los flujos de agua y energía logran ser integrados a través del ciclo hidrológico en el que cualquier cambio en el sistema (usos del suelo) tiene un papel preponderante en el ciclo hidrológico. La ausencia de criterios de evaluación en los modelos hidrológicos en el ámbito nacional han generado que los niveles de incertidumbre en los resultados presentados conlleven a una interpretación sesgada frente al cuerpo hídrico lo cual genera una ausencia en la objetividad de la planificación de un

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

territorio y la evaluación de la importancia del uso del suelo en las cuencas hidrográficas frente al ordenamiento de un territorio (Jenita Mary Nongkynrih & Zahid Husain, 2011).

La subcuenca del Río Apulo hoy por hoy presenta condiciones alteradas frente a los procesos de lluvia – escorrentía y exhibe dificultades asociadas a inundaciones generadas por los cambios de uso del suelo a lo largo del cuerpo de agua; adicionalmente es una de las subcuencas en que la investigación y la evaluación de los procesos hidrológicos no se ven desarrollados (Planeación ecológica Ltda., 2017).

Las características morfométricas definen el estado de la subcuenca hidrográfica del Río Apulo en las que se identifican las relaciones altura – área, la pendiente y las condiciones particulares del suelo; tipos de suelos, usos del suelo y por consiguiente conflictos del uso del suelo; toda esta información es básica a fin de determinar la temporalidad y el comportamiento específico del escurrimiento en la subcuenca del Río Apulo. A su vez las características del drenaje determinan la velocidad y demás parámetros hidrológicos que en respuesta condicionan la capacidad de la cuenca frente a las precipitaciones que en la zona se presenten (Aparicio Mijares, 2003).

El Sistema de Información Geográfica ArcGis 10.3 con su extensión HEC – GeoHMS permite obtener la información geomorfológica de la cuenca en la que los Modelos Digitales de Elevación (DEM) permitirán obtener direcciones de flujo, pendientes, distribución de microcuencas en la subcuenca, longitudes de cauce y demás información que permite obtener las condiciones básicas de la subcuenca.

Los modelos hidrológicos o procesadores estadísticos de lluvia – escorrentía se basan principalmente en la recopilación de la información definida anteriormente y las características de precipitación en la zona en la que se logra obtener entre otras cosas los hidrogramas unitarios

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

de salida producto de las condiciones morfométricas del área de estudio y las condiciones de precipitación de la misma; responden a una necesidad en la investigación fiscalizando la intuición científica de una manera fiable de un sistema hidrológico a través de escenarios diversos con un propósito específico, evaluar el comportamiento de la lluvia en un cuerpo de agua.

HEC – HMS ha sido utilizado en diversos procesos de evaluación e investigación hidrológica en los que estiman los caudales máximos generados por los procesos de lluvia esorrentía en las cuencas hidrográficas, el presente proyecto se centra en los procesos de calibración y validación del modelo de simulación para la subcuenca del Río Apulo haciendo uso de la información morfométrica obtenida con el uso de la extensión de ArcGIS 10.3, HEC – GeoHMS, la precipitación máxima en 24 horas de las estaciones operadas por la CAR¹ así como del periodo de retorno de 25 años propuesto para la investigación y los valores de curva numero obtenidos de las capas de uso del suelo, tipos de suelo de la zona generados por el IGAC²

MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente es necesario mencionar que la información mínima requerida fue obtenida de diferentes fuentes de información; en primera instancia y lo que respecta a los DEM del terreno fueron tomados del visor Alaska Satellite Facility de la NASA, la información referente a las características de la cuenca como lo son los tipos de suelo, la porosidad, los usos del suelo fueron obtenidos del IGAC y finalmente la información meteorológica fue capturada de las estaciones hidrometeorológicas de la CAR.

¹ CAR: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

² IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Para el desarrollo de los procesos de simulación se utilizaron las herramientas de ArcGis 10.3, la extensión Hydro Tools y HEC – GeoHMS, finalmente el software HEC – HMS siendo esta la herramienta básica para la evaluación hidrológica respectiva.

Área de estudio

Los fenómenos de inundación en el territorio colombiano son condiciones que no son unilaterales, que además de las afectaciones a los ecosistemas, a la calidad del recurso hídrico se haya el factor social, variables que desde la Gestión del Riesgo se encuentran inmiscuidos; sin embargo es importante identificar que en algunas cuencas hidrográficas este fenómeno se da como resultado de variables como los cambios de uso del suelo, modificaciones en el transporte de sedimentos en los afluentes producto de vertimientos o extracciones que se desarrollen en los mismos.

Es por ello que la selección del área de estudio incluye entre otras cosas antecedentes asociados a fenómenos de inundación la cuales se presenta como un área característica con cambios de uso del suelo a analizar frente al proceso de modelación hidrológica.

La subcuenca del río Apulo ha presentado en los últimos 20 años procesos de compactación de suelos motivados en los asentamientos humanos generados a lo largo del Río Apulo y en sus afluentes principales llevados a cabo propiamente en los municipios de Zipacón, Bojacá, La Mesa, Anapoima y Apulo (CAR Cundinamarca, 2018).

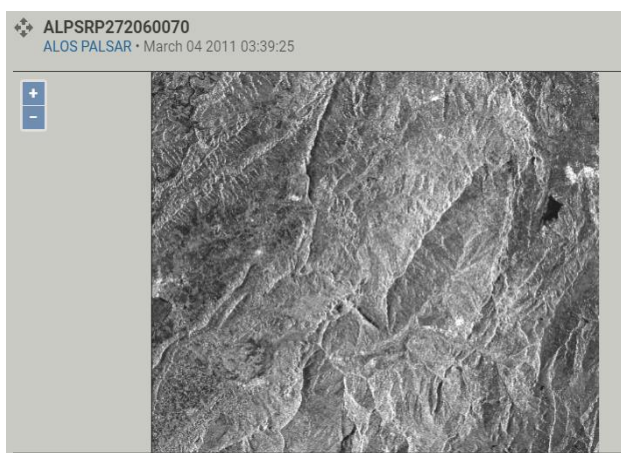
La Subcuenca del Río Apulo pertenece a la cuenca baja del Río Bogotá, ubicada en el Departamento de Cundinamarca y conformada por los municipios de Facatativá, Bojacá, Chachipay, Zipacón, La Mesa, Albán, Quipile, Bituima, Anapoima, Apulo, Anolaima, Tena y Tocaima.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Modelo de Elevación Digital (DEM)

El uso de los DEM del terreno contiene información hidrológica que permite delimitar cuencas hidrográficas, para el área de estudio se utilizaron las imágenes satelitales del satélite ALOS PALSAR proyectadas a coordenadas MAGNA Colombia Bogotá. Las imágenes ALPSRP272060070 y ALPSRP272060080 capturadas el día 04 de marzo del año 2011 siendo las 03:39 a.m. A continuación se relacionan cada una de las imágenes aplicadas.

Ilustración 2. Imagen ALOS PALSAR 272060070 obtenida.



Nota: Fuente propia capturada del visor Alaska Satellite Facility de la NASA.

Ilustración 1. Imagen ALOS PALSAR 272060080 obtenida.



Nota: Fuente propia capturada del visor Alaska Satellite Facility de la NASA.

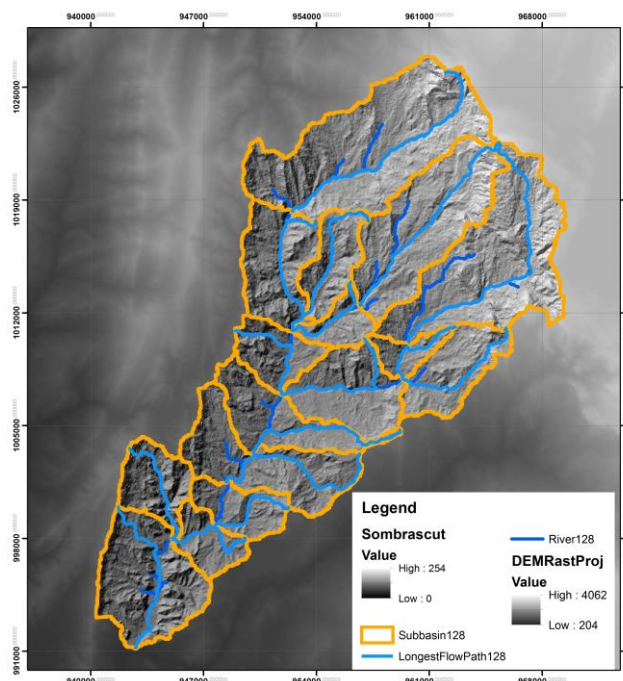
Para la delimitación de la subcuenca del Río Apulo fue necesaria la extensión de ArcGIS “Hydro Tools” en la que se identificó el área total de la cuenca la cual se observa en la ilustración 3.

Determinación de la morfometría de la subcuenca.

Para la subcuenca del Río Apulo se obtuvieron dieciséis (16) microcuencas denominadas por defecto por los nombres referenciados en el ArcGis 10.3. A continuación se presenta una vista del esquema del modelo hidrológico implementado en HEC – HMS.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Ilustración 3. Microcuencas subcuenca Río Apulo.



Nota: Fuente propia realizada en arcGIS 10.3, extensión Hydro Tools.

La extensión de ArcGis 10.3 llamada HEC - GeoHMS permite la creación de proyectos hidrológicos en los que es posible determinar las variables morfométricas de las cuencas hidrográficas, para el área de estudio se determinaron las áreas de cada microcuenca las cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Área respectiva por cada microcuenca.

Microcuenca	Área (Km ²)
W570	81,932
W600	52,503
W610	28,644
W640	16,975
W690	69,405
W720	9,927
W740	15,899
W750	7,935
W770	29,663
W790	22,662

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Microcuenca	Área (Km ²)
W830	25,983
W890	37,718
W900	17,755
W920	15,393
W930	12,433
W940	40,897

Nota: Presenta las áreas obtenidas mediante ArcGIS 10.3 a partir del DEM, Fuente propia.

Tiempo de concentración y el tiempo de retardo

Para la subcuenca del Río Apulo se determinó el tiempo que tarda el agua en escurrir desde el punto más lejano de cada una de las microcuencas hasta el punto de salida o unión de los tramos, adicionalmente fue necesario calcular el tiempo transcurrido desde los centros de gravedad de los Hietogramas de precipitación neta hasta el extremo del Hidrograma; la tabla 2 presenta la información para cada microcuenca.

Tabla 2. Tiempo de concentración y de retardo por microcuenca.

Microcuenca	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	Tc (h)	Tlag (h)
W570	17,879	0,116	4,044	2,426
W600	15,736	0,134	3,570	2,142
W610	11,067	0,068	3,105	1,863
W640	10,297	0,090	2,789	1,673
W690	20,376	0,108	4,528	2,717
W720	7,252	0,103	2,082	1,249
W740	8,184	0,090	2,345	1,407
W750	6,555	0,112	1,897	1,138
W770	10,631	0,071	2,991	1,795
W790	10,040	0,136	2,528	1,517
W830	12,439	0,065	3,422	2,053
W890	13,701	0,050	3,875	2,325
W900	8,291	0,129	2,209	1,325
W920	6,848	0,087	2,060	1,236
W930	7,446	0,036	2,595	1,557
W940	12,535	0,082	3,300	1,980

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Nota: Cálculo del tiempo de concentración mediante la fórmula de Témez (Franquet Bernis Jose Maria, 2005) y el cálculo del tiempo de retardo el cual está determinado como el 60% del tiempo de concentración, Fuente propia.

Flujo base

El flujo base presente en la subcuenca del Río Apulo se obtuvo a través del RASTER de escorrentía de Colombia a escala 1:50.000 del IGAC en su área de hidrología en donde se estimó la media de las escorrentías presentadas en cada una de las microcuencas mediante la interpolación de los respectivos intervalos.

Tabla 3. Escorrentía máxima en Colombia.

ESCORRENTÍA MÁXIMA EN COLOMBIA		
OID	Value	Count
0	1,00	50
1	2,00	150
2	3,00	250
3	4,00	350
4	5,00	500
5	6,00	700
6	7,00	900
7	8,00	1250
8	9,00	1750
9	10,00	2250
10	11,00	2750
11	12,00	3500
12	13,00	4500
13	14,00	5500
14	15,00	8000

Nota: Información tomada del Raster de escorrentías en Colombia del IDEAM (IDEAM, 2016).

En la tabla No. 4 se presentan los flujos base para cada una de las microcuencas generados a partir de la interpolación de los datos que se mencionaron en la tabla número 3.

Tabla 4. Escorrentía media en microcuencas de la subcuenca del Río Apulo.

Microcuenca	Área (Km²)	Escorrentía media (mm/año)	Caudal inicial (m³/s)
W570	81,932	1876,51	4,875
W600	52,503	1750,00	2,914
W610	28,644	1750,00	1,590
W640	16,975	1750,00	0,942
W690	69,405	1750,00	3,851
W720	9,927	1750,00	0,551
W740	15,899	1750,00	0,882
W750	7,935	1750,00	0,440
W770	29,663	1750,00	1,646
W790	22,662	1750,00	1,258
W830	25,983	1750,00	1,442
W890	37,718	1618,42	1,936
W900	17,755	1750,00	0,985
W920	15,393	1562,50	0,763
W930	12,433	1708,33	0,674
W940	40,897	1488,64	1,931

Nota: Fuente propia.

Numero de Curva

Determinación del número de curva SCS

Para determinar el número de curva de las microcuencas de la subcuenca del Río Apulo se realizó la implementación de la metodología de combinación de capas presentada en el informe realizado con la colaboración del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) (Ferrer-Julia, Rodríguez, & Estrela, 1995). Básicamente se realizó la asignación de valores de números primos a cada una de las variables que intervienen en el cálculo de número de curva (Pendientes, Usos del Suelo y Grupos Hidrológicos) para la subcuenca del Río Apulo.

Dada la singularidad de los números primos propuestos por la metodología estos fueron multiplicados entre si dando como resultado un numero primo diferente por cada combinación

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

realizada y en el que se el método concibe un numero de curva respectivo (Martínez Álvarez Víctor, 1999). Finalmente se desarrolló una evaluación ponderada en función del área de cada microcuenca y los valores de número de curva presentes, dicha ponderación o media ponderada determino el número de curva que se presenta en los anexos dos (2) y tres (3) y en la tabla 5. A continuación se presenta la metodología implementada para el cálculo e identificación de las pendientes, los usos del suelo y los grupos hidrológicos de la subcuenca del Río Apulo.

Tabla 5. Valores de Curva Número por microcuencas.

Microcuenca	NC ³
W570	65,2148
W600	75,2587
W610	53,9475
W640	61,7122
W690	80,2274
W720	59,8928
W740	52,7367
W750	61,3918
W770	54,4255
W790	63,4415
W830	48,2729
W890	49,9174
W900	53,9581
W920	50,2811
W930	47,9295
W940	45,9692

Nota: Números de curva para cada microcuenca obtenidos a partir de la ponderación de los valores presentes por área, Fuente propia.

Mapa de pendientes

Para el cálculo del mapa de pendientes de la subcuenca del río Apulo se requirió el Modelo de Elevación Digital (DEM) el cual se encuentra definido como una matriz de números ordenados la cual representa la distribución espacial de las elevaciones del área de estudio. Es de

³ NC: Número de curva.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

aclarar que para el método de números primos mencionado anteriormente, las pendientes fueron reclasificadas en dos grandes grupos, el primero con pendientes inferiores al 3% y el segundo con pendientes mayores o iguales al 3%. El mapa de pendientes se encuentra en el anexo número cuatro (4).

Mapa de usos del suelo

Los usos del suelo para la subcuenca del Río Apulo se encuentran clasificados bajo la metodología Corine Land Cover (CLC)⁴, sin embargo y para el método Soil Conservation Services (SCS)⁵ está debe hallarse las respectivas correspondencias. Dichas correspondencias se han obtenido mediante las tablas sugeridas en “Aportación de la teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva” realizadas por Julia Ferrer, Verdú Ruiz, Dimas Suarez y Estrela Monreal (M. Ferrer Julia, A. Ruiz Verdú, M. Dimas Suárez, & T. Estrela Monreal, 1998).

En la tabla No. 5 se encuentra la reclasificación de los usos del suelo en la subcuenca del río Apulo:

Tabla 6. Equivalencias entre los usos del suelo CORINE y SCS.

CÓDIGO Y DESCRIPCIÓN CORINE	USOS DEL SUELO DEL SCS
1.1.1. Tejido urbano continuo	Rocas impermeables
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	Rocas permeables
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	Rotación de cultivos densos
2.3.1. Pastos limpios	Praderas buenas
2.3.3. Pastos enmalezados	Praderas buenas
2.4.1. Mosaico de cultivos	Plantaciones regulares
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	Pradera media
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	Praderas buenas
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	Praderas buenas
3.1.4. Bosque de galería y ripario	Masa forestal muy espesa
3.1.5. Plantación forestal	Masa forestal espesa

⁴ **CORINE:** Corine Land Cover metodología de inventarios de coberturas de la tierra

⁵ **SCS:** Servicio de conservación de Recursos Naturales conocido anteriormente como el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

CÓDIGO Y DESCRIPCIÓN CORINE	USOS DEL SUELO DEL SCS
3.2.2. Arbustal	Masa forestal muy clara
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	Plantaciones regulares
9.9. Nubes	Rocas impermeables

Nota: Equivalencias entre los usos del suelo de los dos métodos globales de usos del suelo, Fuente: (M. Ferrer Julia, A. Ruiz Verdú, M. Dimas Suárez, & T. Estrela Monreal, 1998).

Teniendo en cuenta la distribución del Soil Conservation Service y el área de estudio se obtiene el plano que se haya en el anexo número cinco (5) según los usos del suelo de referencia.

Mapa de grupos hidrológicos

Para identificar los grupos hidrológicos de la subcuenca del río Apulo se determinó teniendo en cuenta los cuatro grupos del método Soil Conservation Service el cual se describe en la tabla número siete (7):

Tabla 7. Grupos hidrológicos SCS.

GRUPO HIDROLOGICO	CARACTERISTICA
A	Suelos en los que el agua se infiltra rápidamente, aun cuando estos se encuentran húmedos, profundos y de texturas gruesas
B	Cuando se encuentran húmedos poseen una capacidad de infiltración moderada. La profundidad del suelo es de media a profunda
C	Cuando se encuentran húmedos poseen una capacidad de infiltración lenta. La profundidad del suelo es inferior a la media
D	Cuando se encuentran húmedos poseen una capacidad de infiltración muy lenta Poseen horizontes de arcilla en la superficie

Nota: Grupos hidrológicos según el tipo de suelo que se encuentra en las zonas de estudio y se reagrupan en los cuatro (4) grupos de referencia, fuente, (Soil Conservation Services U.S Department of Agriculture, 1975).

Geometría de los cauces

El método de Muskingum – Cunge requiere la existencia de las secciones transversales de cada uno de los tramos de cauce en la subcuenca del Río Apulo. La metodología se basa al igual que en el cálculo de pendientes del apoyo del DEM del terreno de la zona de estudio, el anexo número siete (7) se describen gráficamente las secciones transversales de los tramos de la subcuenca del Río Apulo los cuales fueron determinados mediante la extensión 3D analyst y la interpolation lineal de ArcGIS 10.3.

Numero n de manning

El número de manning es un coeficiente de rugosidad del canal del río, sin embargo este depende de algunas variables como el material y por ende el tamaño medio del grano identificado en cada uno de los tramos, las obstrucciones, la condición de flujo y la existencia o no de meadros en la sección de estudio. Por lo anterior y al no poseer información referente de fuentes primarias o de trabajo en campo se ha determinado un coeficiente de rugosidad típico en este tipo de cuencas, el cual es de 0,035 en cada uno de los tramos de estudio.

Definición de hietogramas

La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca posee en su catálogo de estaciones, información relacionada con la Precipitación Máxima en 24 horas del área de estudio; se han elegido del catálogo once (11) estaciones de las que se logró desarrollar el plano de isoyetas de la subcuenca del Río Apulo y de las cuales se obtuvieron los hietogramas de precipitación de las dieciséis (16) microcuencas. La tabla 8 presenta las precipitaciones máximas en 24 multianuales de cada estación, así como el plano de isoyetas descrito en el anexo número ocho (8).

Tabla 8. Estaciones meteorológicas operadas por la CAR.

ESTACIÓN	UBICACIÓN	CÓDIGO	X	Y	PMÁX multianual
DARÍO					
VALENCIA	EL COLEGIO	2120183	960600	1000400	150
BOQUEMONTE	SOACHA	2120661	1000000	1000000	102
AMERICA	VIOTA	2120215	1132748	1107160	138
LAS VIOLETAS	AGUA DE DIOS	2120637	931870	973395	111
LA MESA	LA MESA	2120639	957190	1003360	107
SAN GREGORIO	SAN JAVIER	2120180	955600	1011130	120
PEDRO PALO	TENA	2120178	965470	1009920	112
PEÑAS BLANCAS	EL COLEGIO	2120182	967200	995200	78
ARGENTINA	QUIPILE	2120179	951300	1017600	140
MANJUI	FACATATIVA	2120174	965100	1022500	99
EL PLACER	PULI	2123502	928174	1007762	125

Nota: Precipitaciones máximas multianuales por estaciones operadas por la CAR, fuente propia.

Los hietogramas de precipitación de cada microcuenca fueron obtenidos mediante la implementación del metodo de hietogramas simétricos (Ven te Chow, David R. Maidment, & Larry W. Mays, 1994) en donde el hietogramas se basa en la media ponderada y la desviación estándar de las precipitaciones presentes en las microcuencas, los gráficos del 12 a la 27 que se encuentran en el anexo número nueve (9) presentan cada uno de los hietogramas de precipitación de las microcuencas de la subcuenca del Río Apulo.

HEC-HMS

HEC- HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) es un modelo hidrológico de acceso libre desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del Army Corps of Engineers el cual permite simular los procesos de lluvia escorrentía en una cuenca hidrográfica, es decir, permite evaluar que sucede en un determinado punto de la cuenca con la escorrentía producida en un episodio de lluvia.

Los componentes del modelo se basan en relaciones matemáticas las cuales representan los procesos que intervienen para la generación y circulación de hidrogramas de escorrentía

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

como lo son las pérdidas y la transformación del exceso de lluvia en un caudal que sale de la cuenca. Por lo anterior es claro identificar que al interior de HEC – HMS es la representación de la cuenca basada en una red ramificada de sistemas hidrológicos – hidráulicos (subcuencas – embalses) conectados por sistemas hidráulicos (cauces).

Las subcuencas, los cauces y/o los embalses se caracterizan por una serie de parámetros que especifican las características particulares que los definen y las asociaciones matemáticas que definen el comportamiento (Estrada Sifontes & Pacheco Moya, 2012).

HEC – HMS contiene cuatro (4) etapas las cuales definen la entrada de datos y por consiguiente la estructura de simulación de la cuenca hidrográfica de estudio; inicialmente el programa requirió unos datos de entrada los cuales fueron los que hasta ahora se han descrito en la investigación; la segunda etapa fue el modelo de cuenca el cual se requirió para representar la sección física de la cuenca en donde particularmente se ingresaron las conexiones de los distintos elementos hidrológicos (subcuencas, embalses y cauces); la tercera etapa calculo la precipitación requerida en las secciones de la cuenca (subcuencas) las cuales fueron determinadas por el plano de isoyetas de las precipitaciones máximas en 24 horas y como cuarta etapa se requirieron especificaciones de control asociadas a los tiempos de duración de la simulación, es decir el periodo de tiempo en el que se esperaba se presentaran la precipitación sobre la cuenca.

Calibración

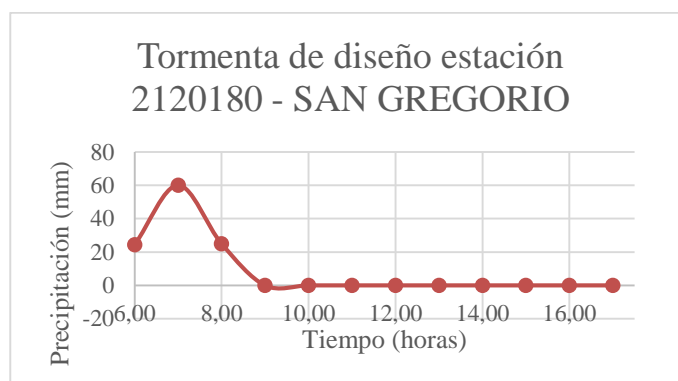
Para el proceso de calibración se realizó la optimización mediante el número de curva de las microcuencas de la subcuenca del río Apulo, una buena calibración conlleva a información primaria que cuantifique verídicamente los caudales y las tormentas de diseño presentadas en la

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

zona en un periodo de tiempo puntual, la cual condicionará si los valores de numero de curva son consecuentes con las variables ingresadas en el modelo.

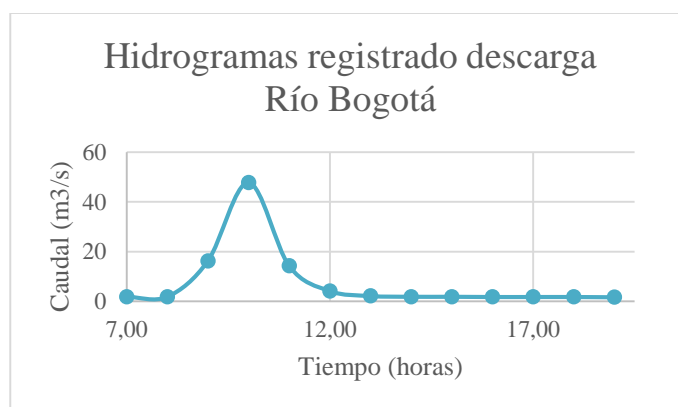
Para la zona de estudio se ha elegido la microcuenca denominada W720 la cual posee en su área delimitada la estación “SAN GREGORIO” administrada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y la cual posee información asociada a una tormenta de diseño y unos caudales horarios de la misma tormenta de diseño los cuales se encuentran en los diagramas uno (1) y dos (2).

Diagrama 1. Tormenta de diseño presentada en estación 2120180 - SAN GREGORIO.



Nota: Tormenta de diseño presentada en la estación San Gregorio ubicada en el municipio de Cachipay, departamento de Cundinamarca bajo código 2120180 de las 14:00 horas a las 17:00 horas en el año 2018 mes abril, fuente: Catalogo de estaciones CAR Cundinamarca.

Diagrama 2. Hidrograma de descarga del Río Bogotá.



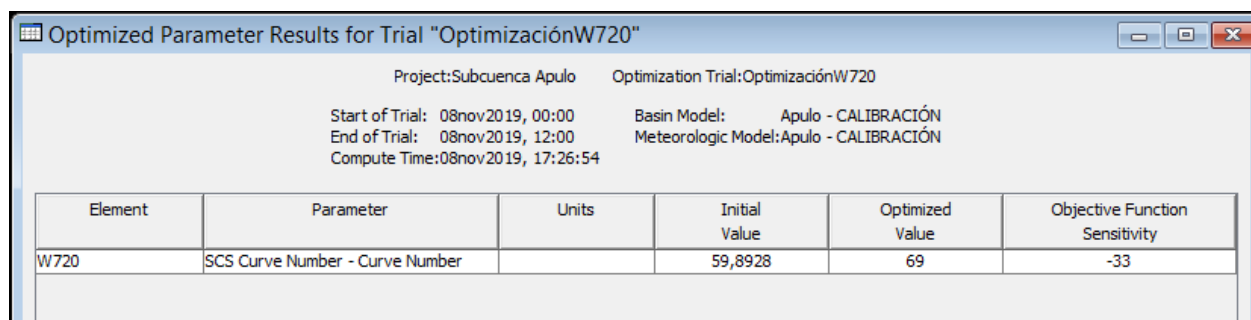
MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Nota: Hidrograma de salida en el Río Bogotá con tiempo de respuesta de una hora en la subcuenca del Río Bogotá registrado en el área de estudio.

La calibración del modelo HEC HMS establece un reajuste u optimización para el proyecto de los valores de curva número de las microcuencas de la subcuenca de estudio los cuales fueron obtenidos del producto entre las capas de pendientes, usos y tipos de uso del suelo, el modelo HEC – HMS en la calibración ha sugerido una optimización del número de curva considerable, sin embargo a continuación se relaciona el ajuste con el análisis de ortofotos de la subcuenca, específicamente de la microcuenca la cual sustenta el cambio del número de curva.

La ilustración numero

Ilustración 4. Sugerencia del cambio en el número de curva para la microcuenca W720.



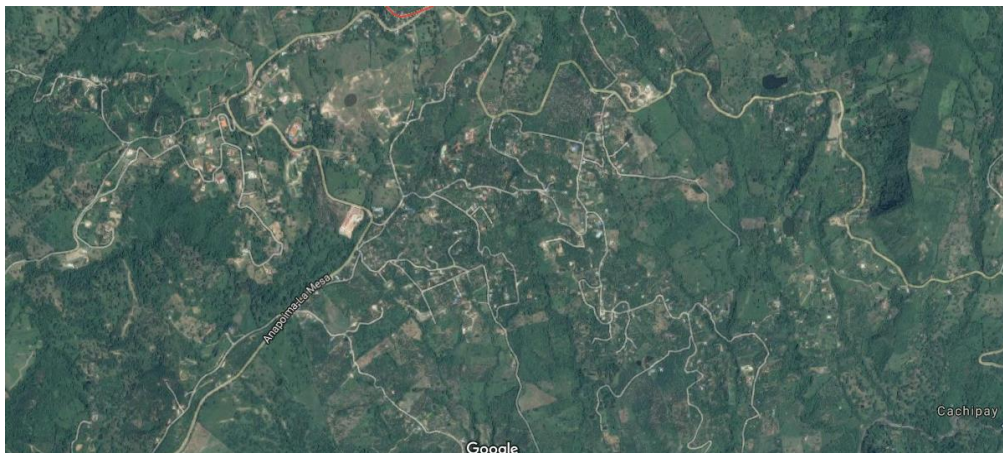
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
W720	SCS Curve Number - Curve Number		59,8928	69	-33

Nota: Registro en HEC – HMS del valor de curva número optimizado para la microcuenca W720, fuente propia.

La calibración sugiere aumentar el número de curva para conseguir un ajuste optimo del modelo que para la zona de estudio se ajusta a los cambios en el uso del suelo generados en la microcuenca W720, zona en la que en el municipio de La Mesa, inspección San Javier se han visto generadas construcciones de uso residencial que han compactado e impermeabilizado el suelo y a lo que podemos considerar como aceptado el ajuste dada la realizad de la zona.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

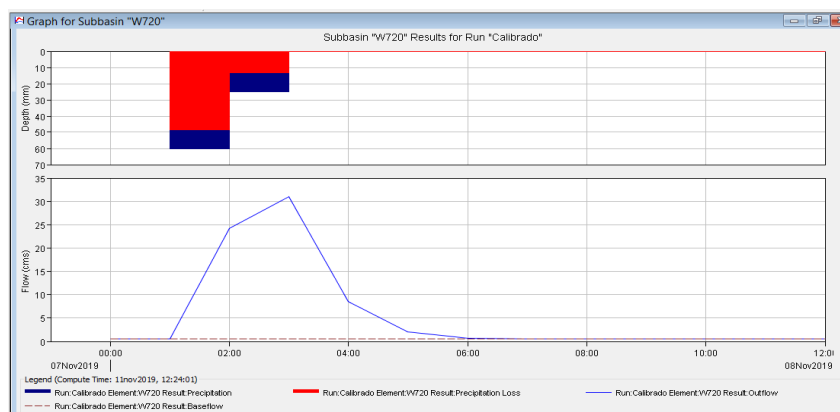
Ilustración 5. Cambios en el uso del suelo, Municipio de la Mesa, inspección San Javier.



Nota: Evidencia de los cambios en el uso del suelo en los últimos 10 años en la inspección San Javier, municipio de La Mesa, pertenecientes a la microcuenca W720 (objeto de calibración), fuente Google maps 2019.

Al modificar la variable de curva número en la microcuenca es posible observar variaciones en los patrones de escorrentía en la microcuenca, alteraciones que confirman optimizaciones en el modelo implementado. A continuación se observan los comportamientos de la microcuenca W720 antes y después de la calibración:

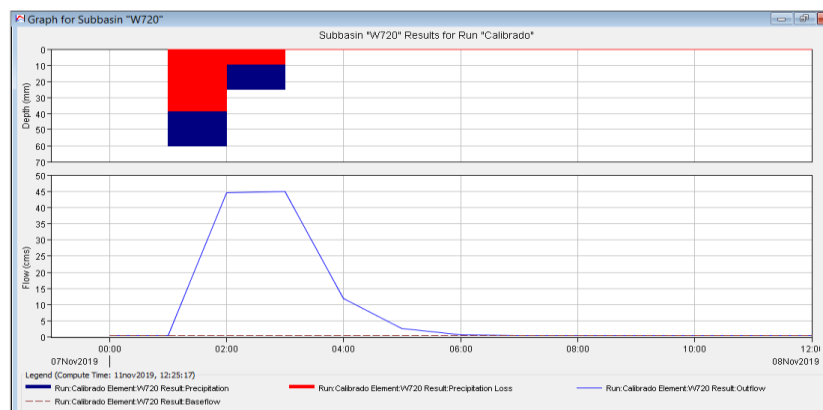
Ilustración 6. Resultados sin calibración- microcuenca W720.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Nota: Resultados de la precipitación, infiltración y el caudal de salida de la microcuenca W720 antes de ser calibrada frente a las condiciones de flujo de la subcuenca del Río Apulo, fuente propia.

Ilustración 7. Resultados en la microcuenca W720 – calibrada.



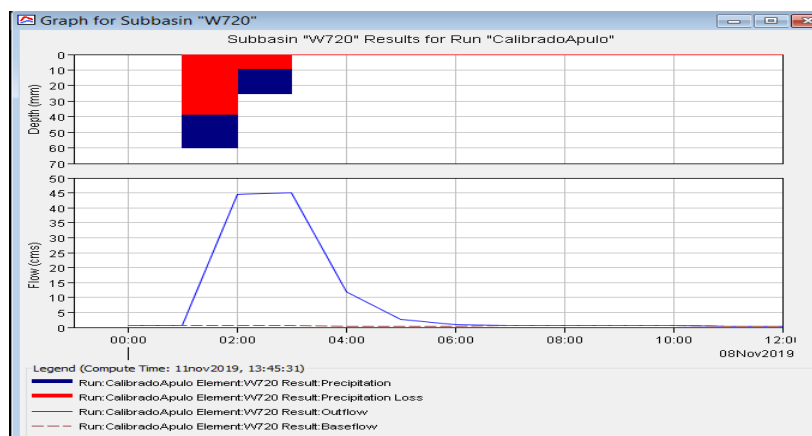
Nota: Resultados de la precipitación, infiltración y el caudal de salida de la microcuenca W720 luego de ser calibrada frente a las condiciones de flujo de la subcuenca del Río Apulo, fuente propia.

Validación

Luego de la calibración del modelo de la subcuenca del Río Apulo y al considerar que la optimización propuesta por HEC – HMS se ajusta a la realidad de las condiciones de la subcuenca se proyectaron para un periodo de retorno de veinticinco (25) años hietogramas de precipitación para las microcuencas para observar el comportamiento del modelo obtenido. Los hietogramas de precipitación se presentan en el anexo diez (10).

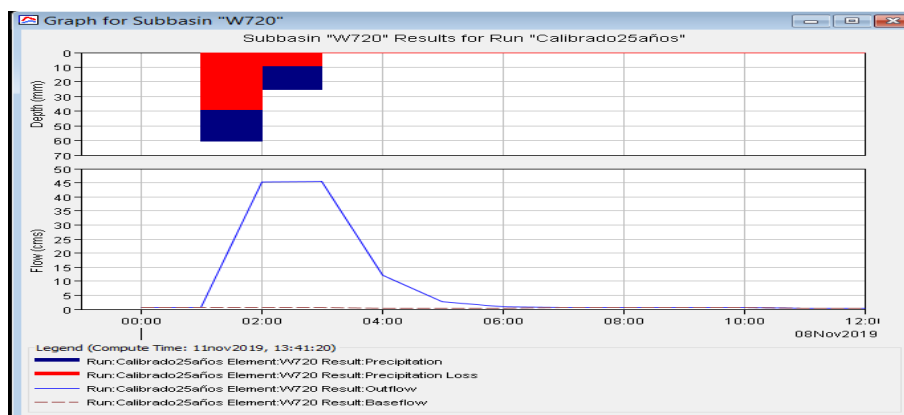
MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Ilustración 8. Hidrograma de salida para precipitación máxima microcuenca W720.



Nota: Resultados de la precipitación, infiltración y el caudal de salida de la microcuenca W720 validada en todo el modelo hidrológico de la subcuenca del Río Apulo la cual coincide con el Hidrograma de salida de la calibración, fuente propia.

Ilustración 9. Hidrograma de salida para precipitación máxima microcuenca W720 para un periodo de retorno de 25 años



Nota: Resultados de la precipitación, infiltración y el caudal de salida de la microcuenca W720 validada en todo el modelo hidrológico de la subcuenca del Río Apulo para un periodo de retorno de 25 años, fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA DE DRENAJA (KM ²)	PICO DE DESCARGA (M ³ /S)	TIEMPO EN LLEGAR AL PICO	VOLUMEN (MM)
W770	29,663	64,1	08nov2019, 03:00	16,89
W740	15,899	34,1	08nov2019, 03:00	16,63
W720	9,927	45	08nov2019, 03:00	39,42
W610	28,644	81,5	08nov2019, 03:00	22,41
W640	16,975	62,4	08nov2019, 03:00	30,5
W570	81,932	315,3	08nov2019, 03:00	32,68
W600	52,503	291,2	08nov2019, 02:00	46,09
W790	22,662	76,4	08nov2019, 03:00	28,09
W750	7,9353	25,4	08nov2019, 03:00	26,28
W690	69,405	471,5	08nov2019, 02:00	54,39
W830	25,983	36,6	08nov2019, 03:00	10,7
W890	37,718	61	08nov2019, 03:00	12,2
W920	15,393125	26,2	08nov2019, 03:00	12,82
W930	12,433438	17,6	08nov2019, 03:00	10,69
W900	17,755	39,7	08nov2019, 03:00	17,47
SalidaApulo	485,72486	1108,7	08nov2019, 04:00	29,72

Nota: Resultados obtenidos en la validación del modelo hidrológico con cada una de las microcuencas, fuente propia.

De las tablas 8 y 9 se observa que el modelo se encuentra validado al identificar que el aporte de la microcuenca W720 en la salida de la subcuenca del río Apulo es el mismo tanto en la calibración como en la validación del modelo.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La calibración pudo ser más precisa teniendo información de caudales y de tormentas en cada una de las microcuencas a fin de optimizar los valores de curva número dentro de unas variables objetivas, sin embargo el área calibrada ofrece información importante a evaluar.

El modelo HEC – HMS resulta ser un software que representa de buena manera el comportamiento de la pluviometría o la precipitación de forma unimodal acorde a las características de la subcuenca del Río Apulo. En cuanto a la calibración se observa que está coincide con las características de lluvias unimodales en la zona de estudio.

Si el modelo no se llegase a calibrar, los hidrogramas de salida en la microcuenca W720 y por ende en la subcuenca del Río Apulo no tendrían relación unimodal ni caracterizaría las condiciones normales de la zona teniendo en cuenta la información obtenida de caudales y tormentas de la estación SAN GREGORIO.

CONCLUSIONES

La extensión de Arc-GIS 10.3, Hydro tolols permite evaluar hidrológicamente un DEM de cualquier terreno logrando identificar todas y cada una de las características morfométricas de una cuenca hidrográfica, permite entre otras cosas optimizar tiempos de evaluación y captura de la línea base del modelo hidrológico llegando a un nivel de exactitud importante frente a la descripción de un área de estudio

Los modelos hidrológicos del cálculo de los procesos de lluvia escorrentía calibrados y validados representan valores aceptables para simular escenarios futuros de cualquier cuenca hidrográfica, estos determinan diferencias y similitudes según sea el método a implementar; queda demostrado que una línea base sólida o de información objetiva que se posea de la cuenca hidrográfica determinará la calidad y congruencia de la realidad para con la simulación en el que no siempre el uso excesivo de variables se obtiene como resultado una mejor representación del

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Hidrograma calculado, adicionalmente y conforme al proceso de calibración, los valores de curva numero afectan considerablemente el caudal pico de salida en cada microcuenca por lo que el análisis y criterio frente a las sugerencias de optimización son claves para determinar la aceptación o no de las modificaciones de los criterios iniciales ingresados en cada microcuenca.

La medición de hidrogramas así como de hietogramas a lo largo de las cuencas de estudio son un escenario ideal para las pruebas de validación y calibración de los modelos hidrológicos con el fin de lograr con mayor exactitud la identificación de errores numéricos y reducir la incertidumbre de los sistemas hidrológicos modelados por lo que se recomienda para efectuar evaluaciones hidrológicas un trabajo de línea base medible en cuanto a los caudales presentes en cada microcuenca o subcuenca para realizar la calibración de una manera completa e integral.

Este artículo de investigación puede ser considerado un punto de partida para la investigación frente a la exactitud y pertinencia de los procesos de calibración y validación de los parámetros hidrológicos en cualquier cuenca hidrográfica las cuales pueden ser determinantes en el ordenamiento territorial, los cambios del uso del suelo, la construcción de obras ingenieriles para responder al tránsito de avenidas en la regulación de las actividades económicas o de construcción en áreas de inundación de una manera objetiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio Mijares, F. J. (2003). Fundamentos de hidrología de superficie (11° ed.). México D.F: Limusa Noriega Editores.
- Aqnouy, M., El Messari, Jamal Eddine Stitou, Bouadila, A., Bouizrou, I., & Mansour, M. R. A. (2018). Application of hydrological model "HEC HMS" in a mediterranean watershed (oued laou, northern of morocco). International Journal of Innovation and Applied Studies, 24(4), 1773-1781. Retrieved from

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

<http://ezproxy.umng.edu.co:2048/login?url=https://search-proquest-com.ezproxy.umng.edu.co/docview/2151127779?accountid=30799>

CAR Cundinamarca. (2018). Problemática del río apulo/ recuperación río apulo

Retrieved from <http://oaica.car.gov.co/vercaso2.php?id=9>

Estrada Sifontes, V., & Pacheco Moya, R. M. (2012). Aplicación del esquema hidrometeorológico para HEC-HMS en las coloradas. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 33(3), 72-85.

Ferrer-Julia, M., Rodríguez, J., & Estrela, T. (1995). Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería Del Agua*, 2 doi:10.4995/ia.1995.2686

Franquet Bernis Jose Maria. (2005). Capítulo II - determinación del caudal mínimo mediambiental Cálculo hidráulico de las conducciones libres y forzadas (pp. 261-262) Escuela Universitaria de Ciencias Experimentales y Tecnologicas de Cataluña.

IDEAM. (2016). Capas GEO. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/capas-geo>

Jenita Mary Nongkynrih, & Zahid Husain. (2011). Morphometric analysis of the manas river basin using earth observation data and geographical information system. (pp. 647-654)

M. Ferrer Julia, A. Ruiz Verdú, M. Dimas Suárez, & T. Estrela Monreal. (1998). Aportación de la

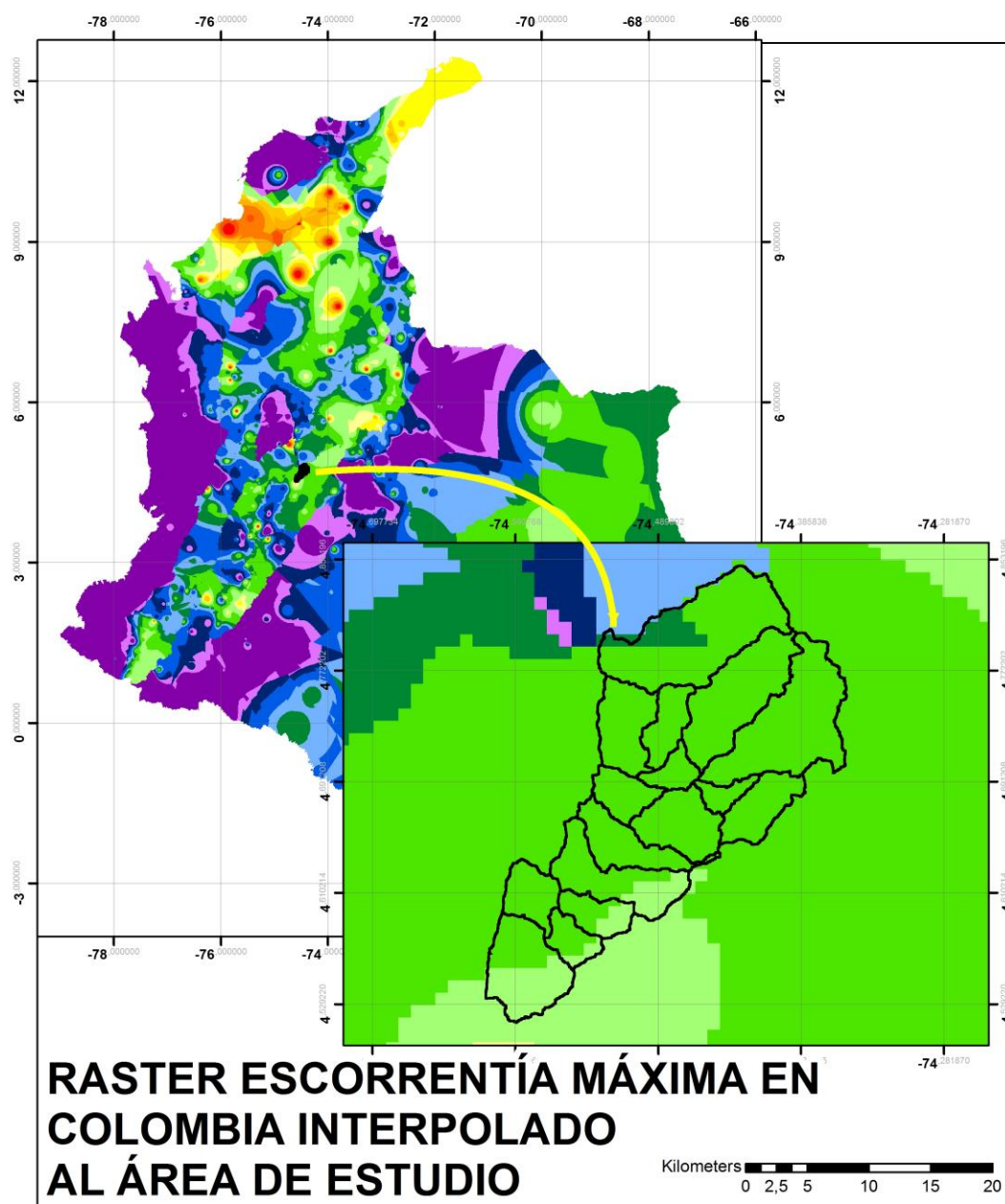
teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva.5(1), 353-46. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/41782171.pdf>

Martinez Alvarez Victor. (1999). Simulación y comprobación experimental de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas mediante modelos distribuidos implementados sobre SIG Retrieved from <http://oa.upm.es/711/1/02199908.pdf>

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

- Planeacion ecológica Ltda. (2017). Diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrografica del río bogotá, subcuenca del río apulo (). Retrieved from <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac254af33ad3.pdf>
- Rodríguez López, Y., Marrero de León, N., & Gil Urrutia, L. (2010). Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río reno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(2), 31-37.
- Soil conservation services U.S Department of Agriculture. (1975). *Soil taxonomy*. Washington:
- Sunitha Koneti, Sri Lakshmi Sunkara, & Roy, P. S. (2018). Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in godavari river basin using the HEC-HMS model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(6), n/a. doi://dx.doi.org.ezproxy.umng.edu.co/10.3390/ijgi7060206
- Vente Chow, David R. Maidment, & Larry W. Mays. (1994). *Hidrología aplicada* (1era ed.). Traducción, Santafé de Bogotá: Nomos S.A.
- Walega, A. (2013). Application of HEC-HMS programme for the reconstruction of a flood event in an uncontrolled basin / zastosowanie programu HEC-HMS do odtworzenia wezbrania powodziowego w zlewni niekontrolowanej. *Journal of Water and Land Development*, 18(9), 13. doi:http://dx.doi.org.ezproxy.umng.edu.co/10.2478/jwld-2013-0002

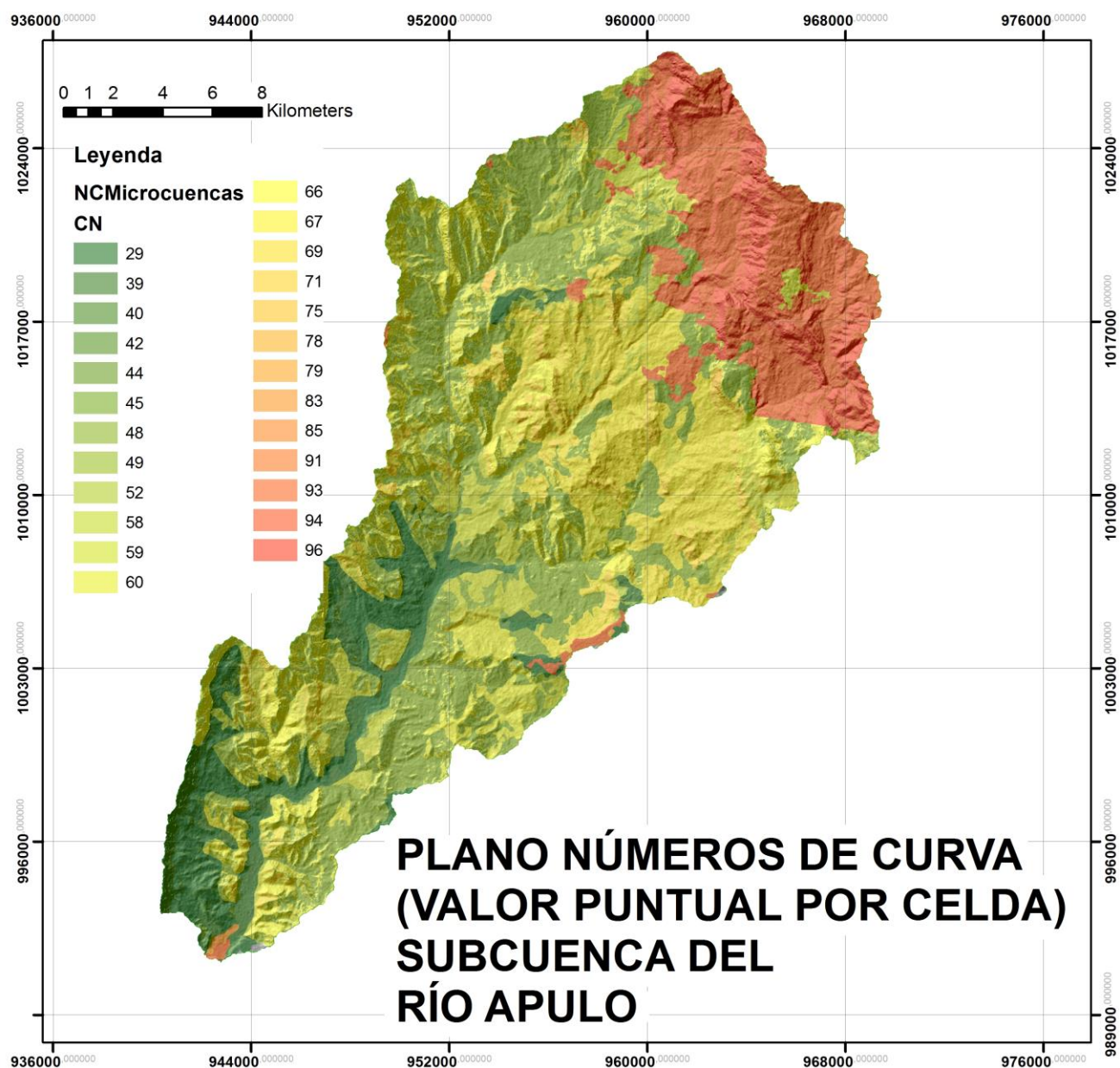
ANEXOS

Anexo 1. Raster de escorrentías en Colombia Escala 1:50.000.

Nota: Cartografía utilizada para el cálculo de flujo base en cada una de las microcuencas del área de estudio (IDEAM, 2016), fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

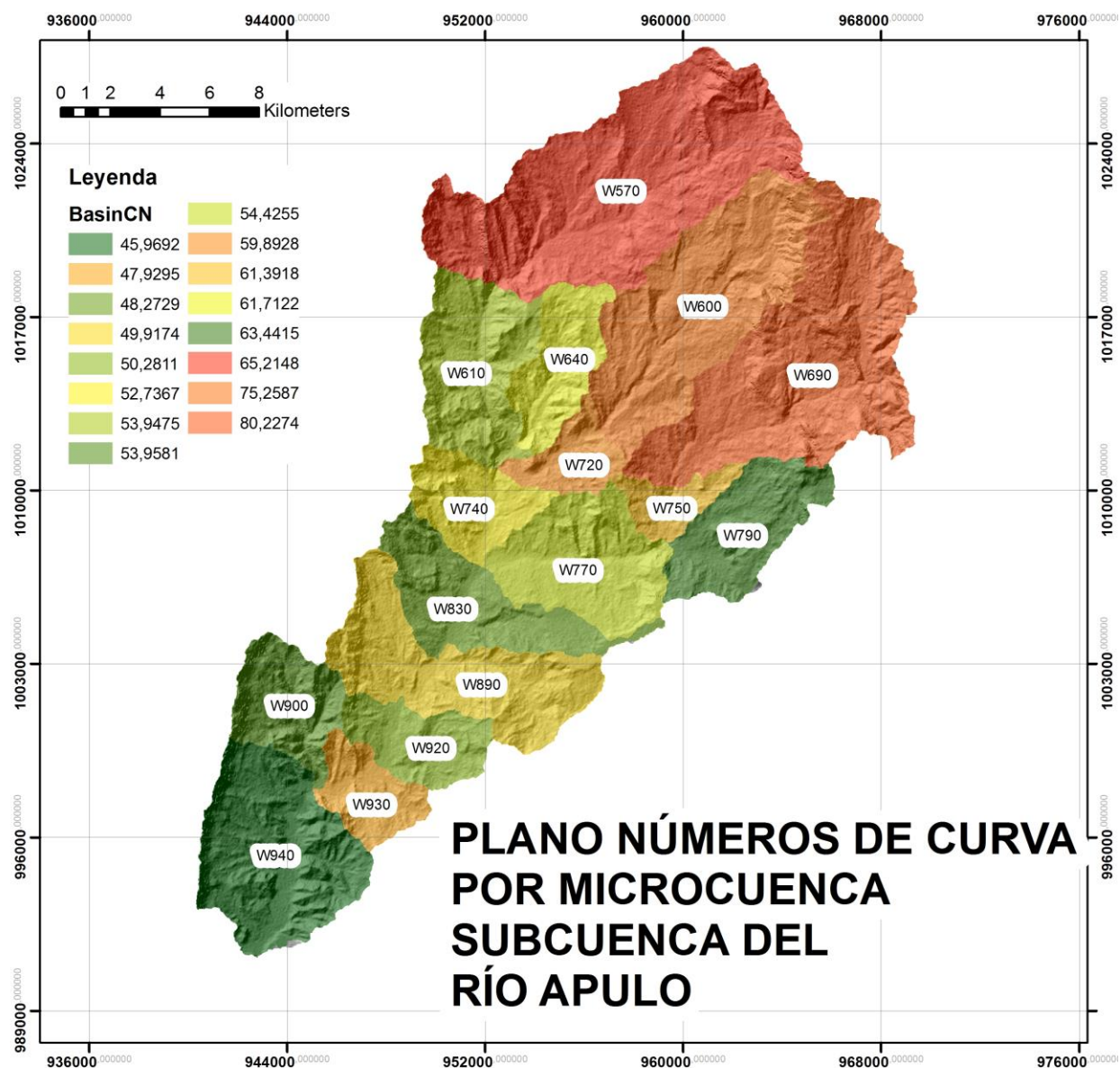
Anexo 2. Números de curva por valores puntuales por celda - Subcuenca Río Apulo.



Nota: Cartografía obtenida a partir del método de números primos y el producto de los planos temáticos de pendientes, usos del suelo y grupos hidrológicos de la subcuenca del Río Apulo, fuente propia.

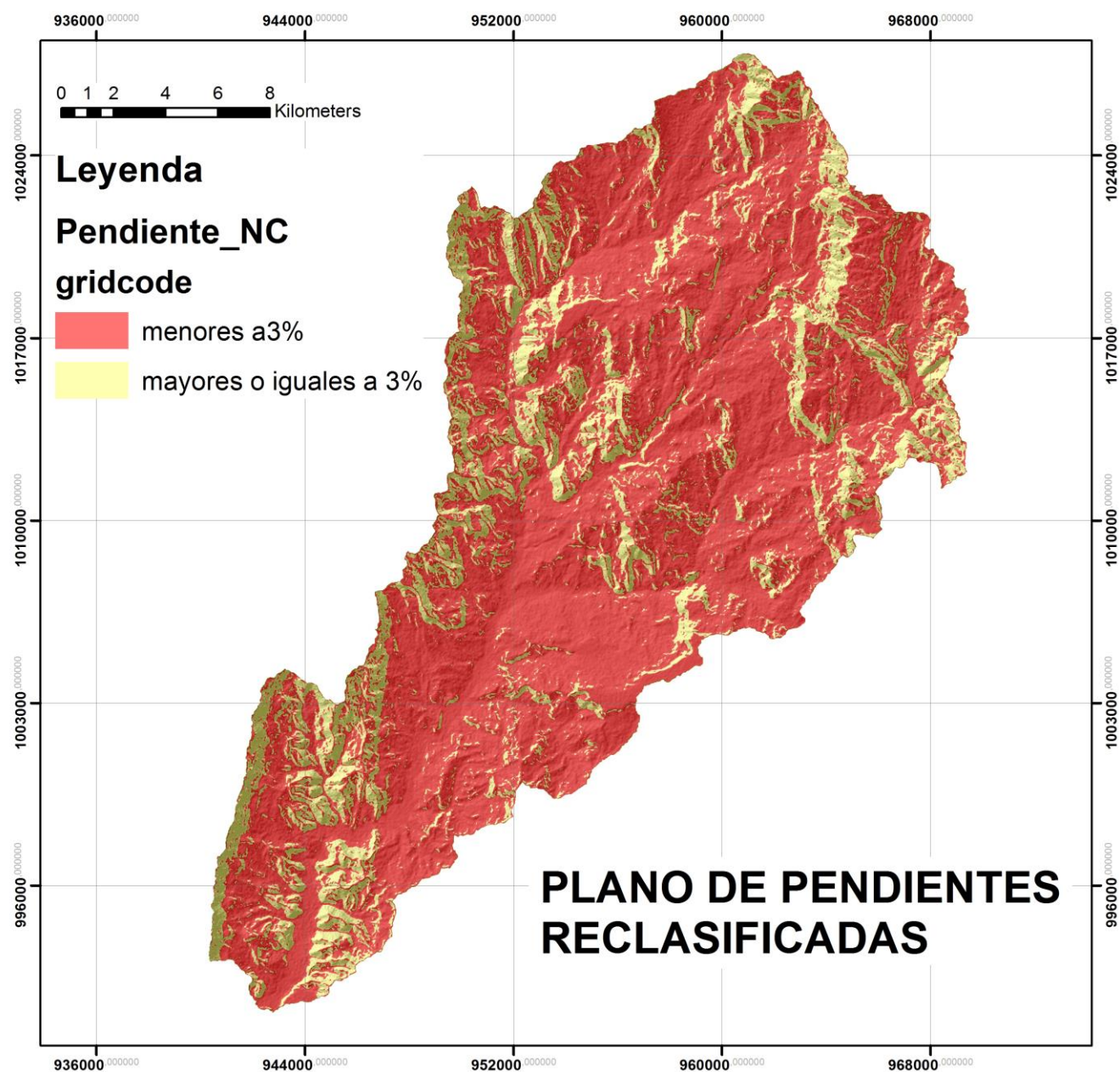
MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 3. Números de Curva ponderado por microcuenca.



Nota: Cartografía obtenida de la ponderación de los números de curva presente en cada microcuenca en función del área de las mismas, fuente propia.

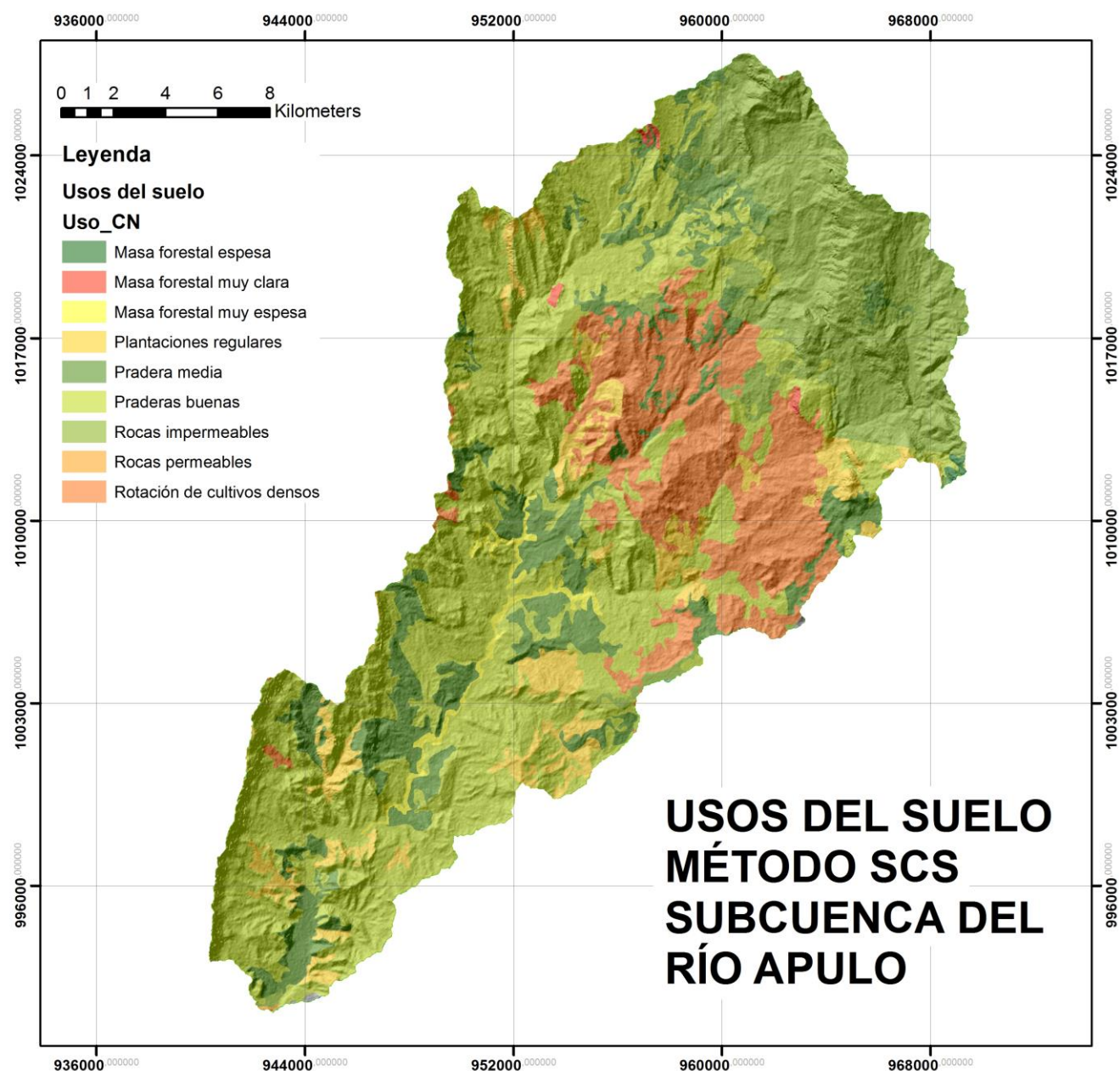
MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 4. Plano de pendientes reclasificadas para cálculo de NC.

Nota: Representa la reclasificación de pendientes obtenida a través del DEM de la subcuenca del Río Apulo, fuente propia.

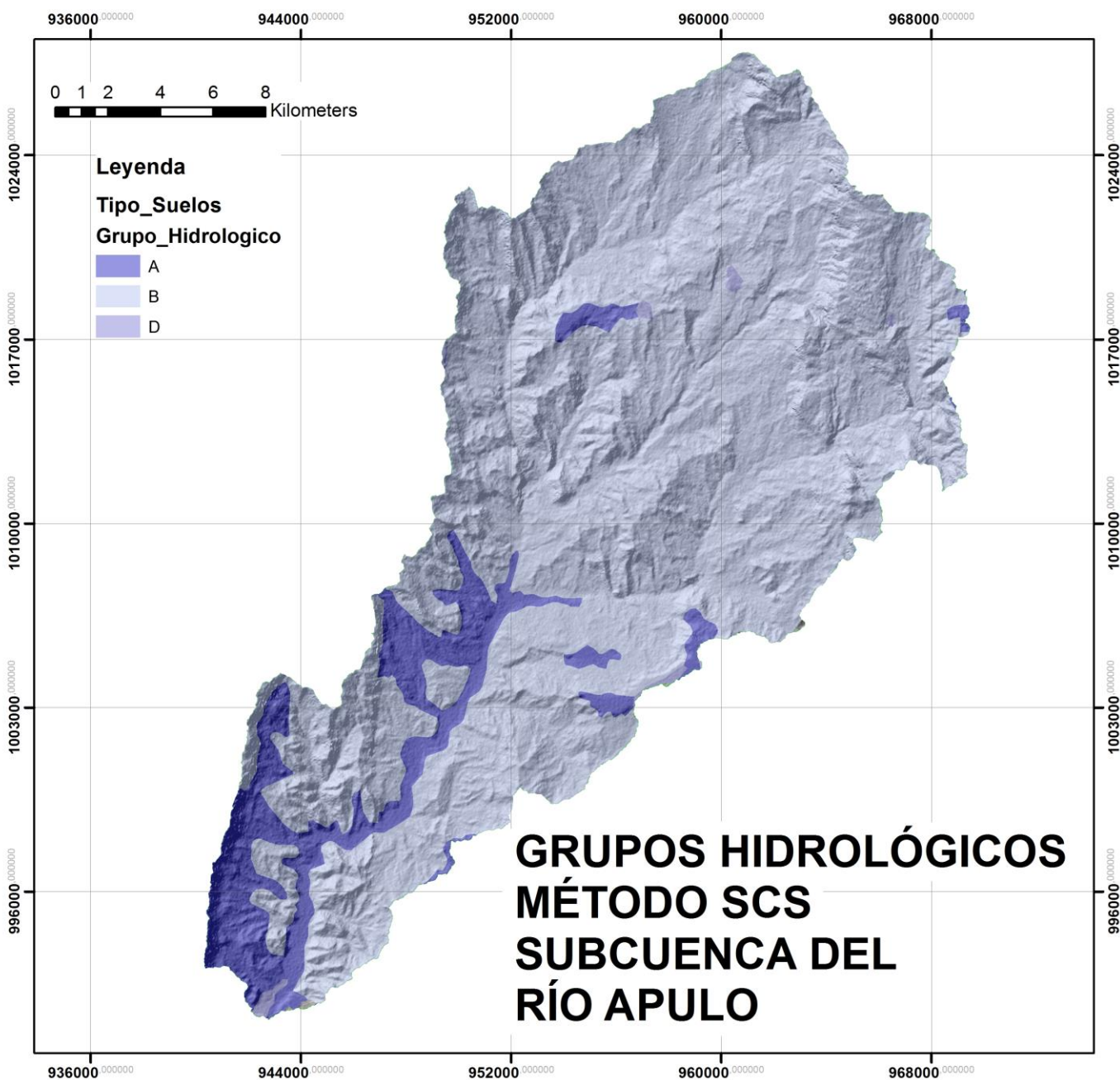
MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 5. Usos del Suelo - Soil Conservation Service.



Nota: Describe los usos del suelo teniendo en cuenta las equivalencias de los mismos entre la metodológica CORINE y SCS, fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 6. Grupos hidrológicos según método SCS.

Nota: Reclasificación de los tipos de suelo presentes en la subcuenca del Río Apulo según el método SCS, fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 7. Secciones transversales para cada uno de los tramos.

Gráfico 1. Sección transversal – tramo uno.

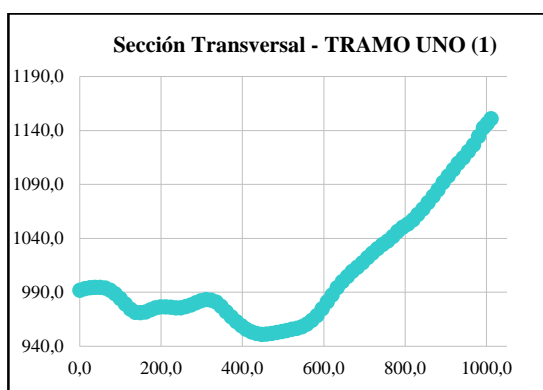


Gráfico 2. Sección transversal – tramo dos.

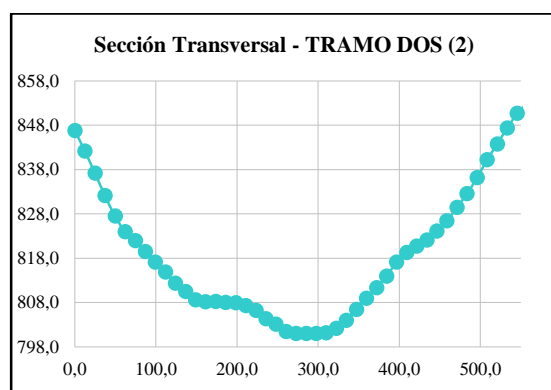


Gráfico 3. Sección transversal – tramo tres.

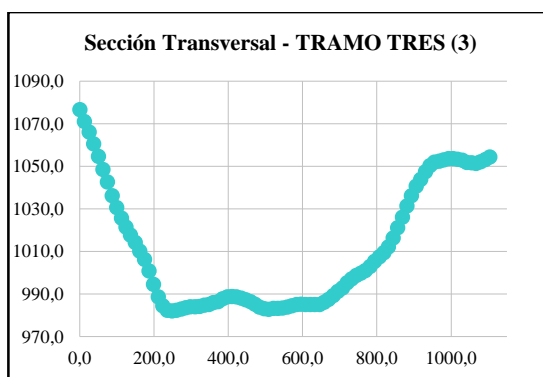


Gráfico 4. Sección transversal – tramo cuatro.

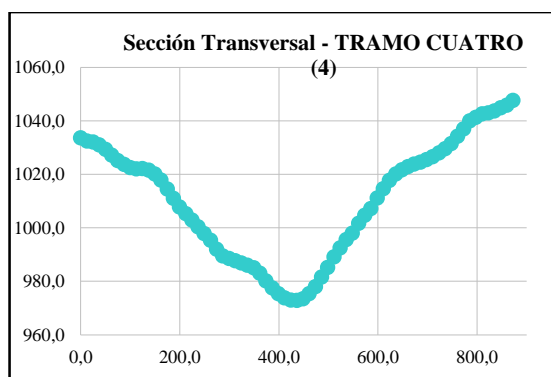


Gráfico 5. Sección transversal – tramo cinco.

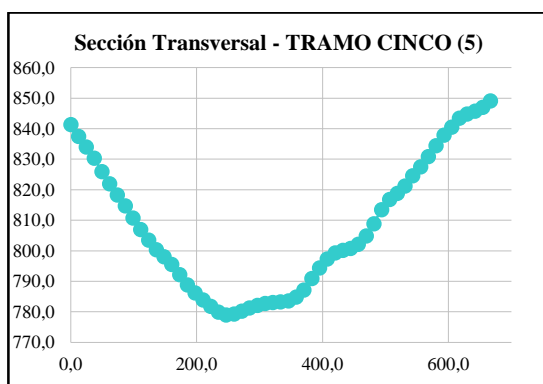
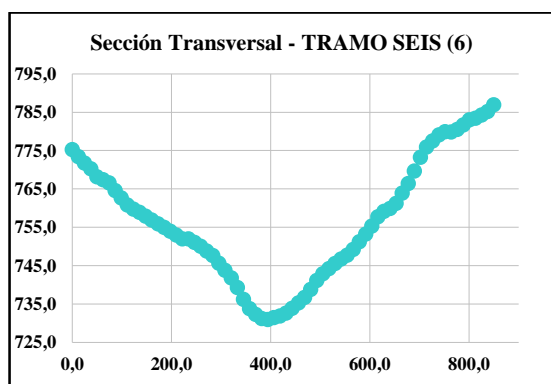


Gráfico 6. Sección transversal – tramo seis.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Gráfico 7. Sección transversal – tramo siete.

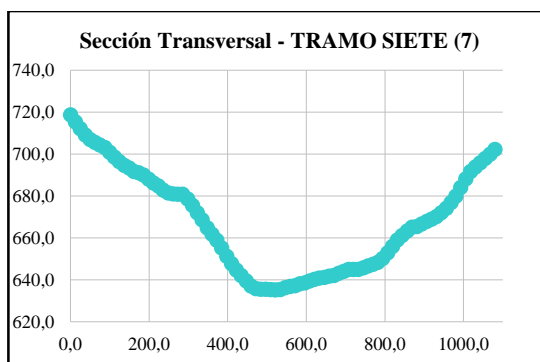


Gráfico 8. Sección transversal – tramo ocho.

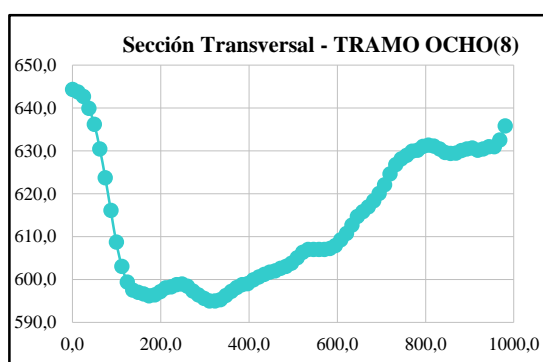


Gráfico 9. Sección transversal – tramo nueve.

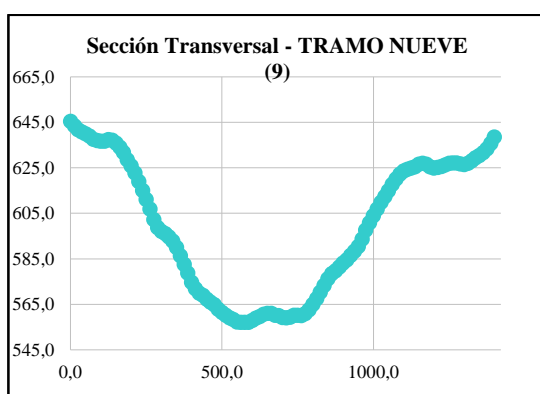


Gráfico 20. Sección transversal – tramo diez.

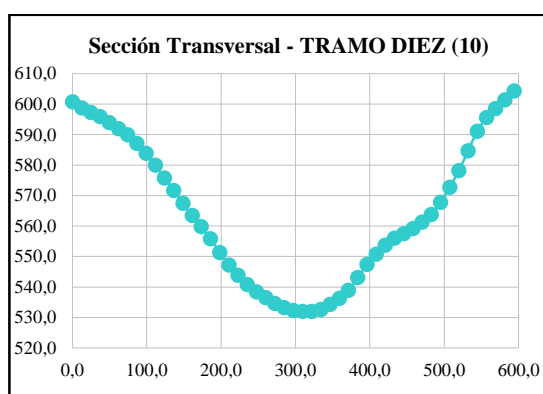
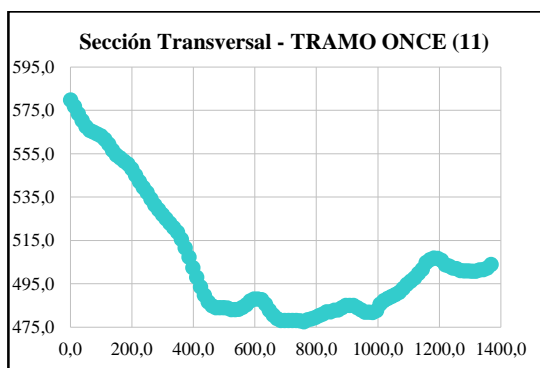


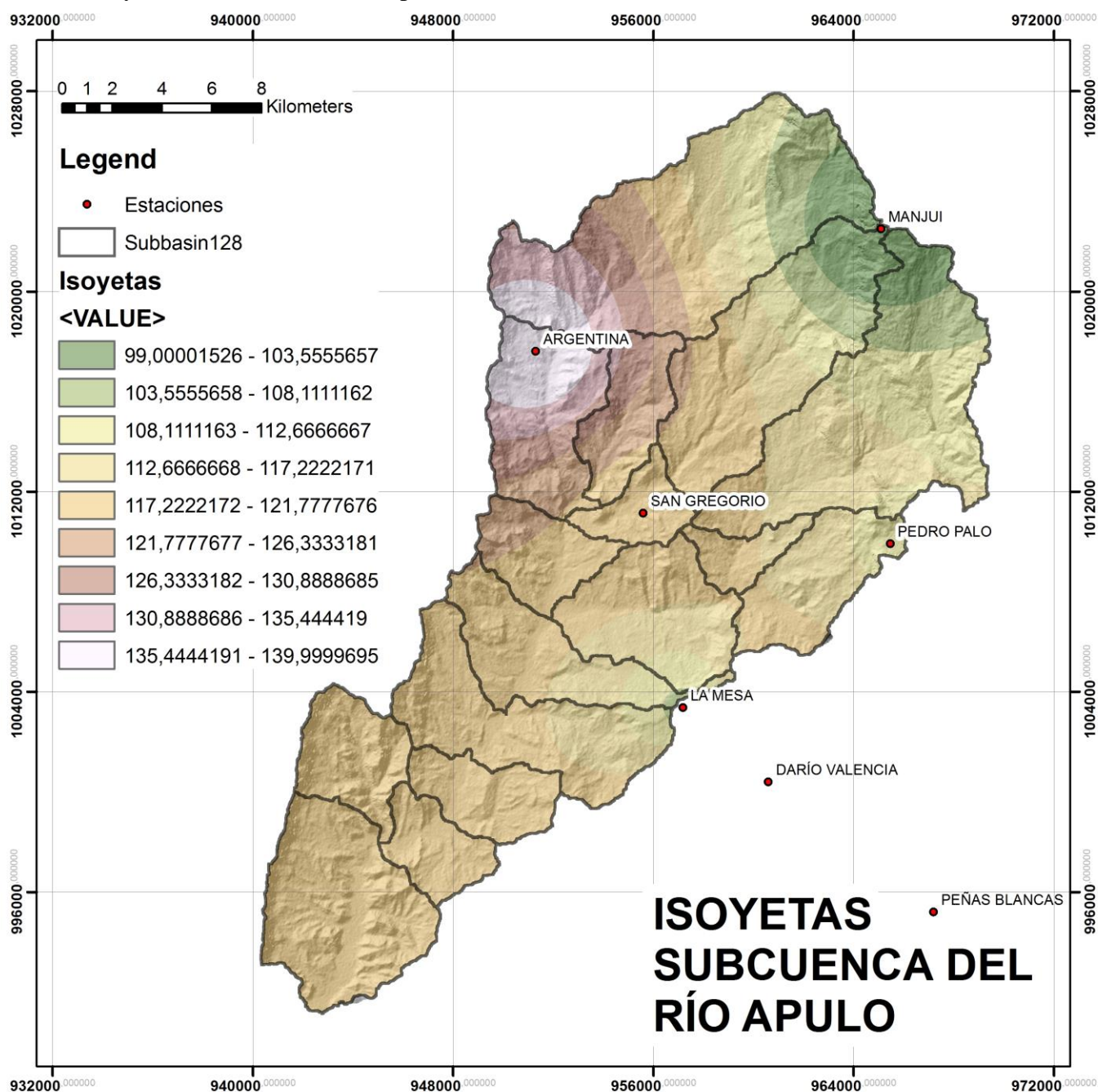
Gráfico 31. Sección transversal – tramo once.



Nota: Secciones transversales obtenidas en ArcGIS 10.3 y el DEM de la subcuenca del Río Apulo, se determinaron las secciones transversales para los once (11) tramos que posee el modelo HEC- HMS en el área de estudio.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 8. Isoyetas subcuenca del Río Apulo.



Nota: Distribución espacial de la temperatura teniendo en cuenta las precipitaciones máximas de las estaciones cercanas a la subcuenca del Río Apulo, fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 9. Hietogramas de precipitación de las microcuencas del área de estudio.

Gráfico 42. Hietograma de precipitación – W570.

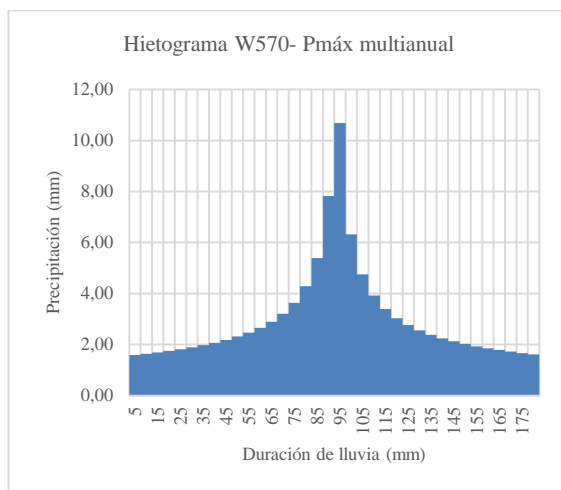


Gráfico 53. Hietograma de precipitación – W600.

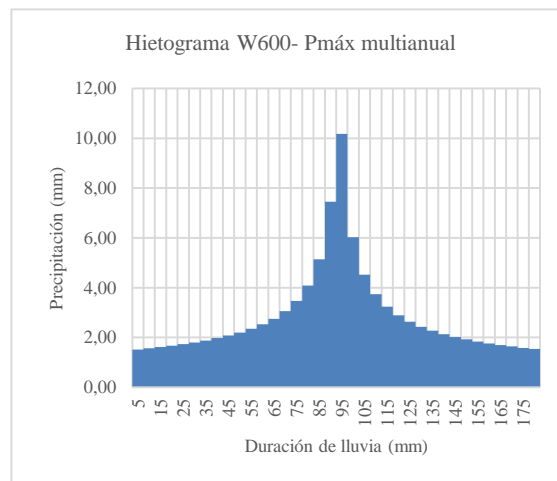


Gráfico 74. Hietograma de precipitación – W610.

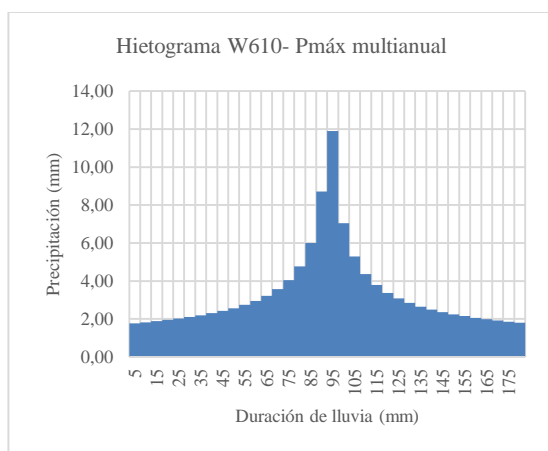


Gráfico 65. Hietograma de precipitación – W640.

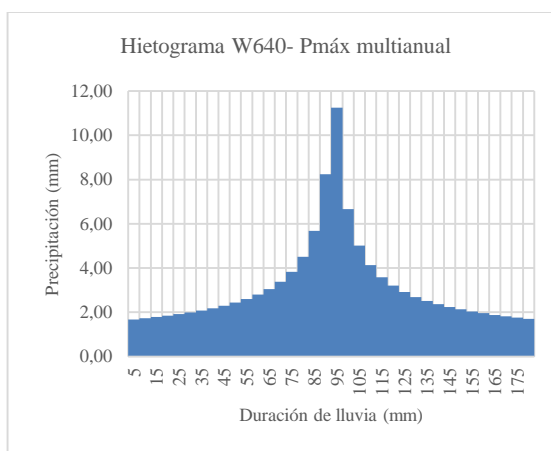


Gráfico 96. Hietograma de precipitación – W690.

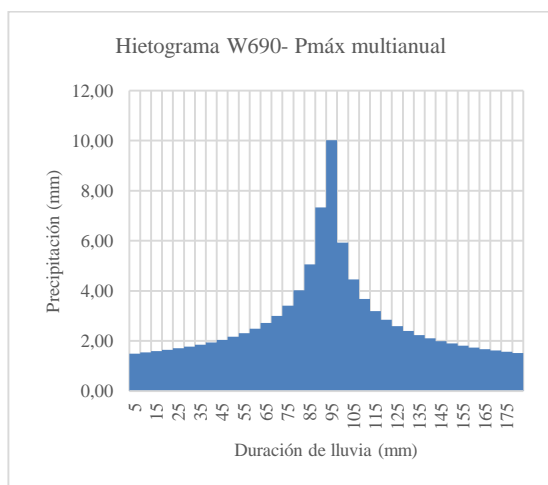
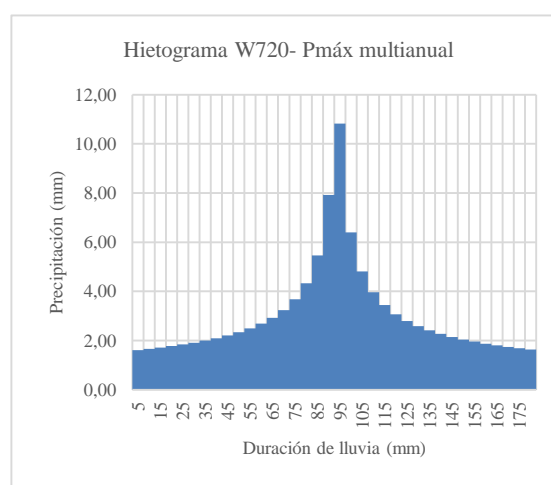


Gráfico 87. Hietograma de precipitación – W720.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Gráfico 108. Hietograma de precipitación – W740.

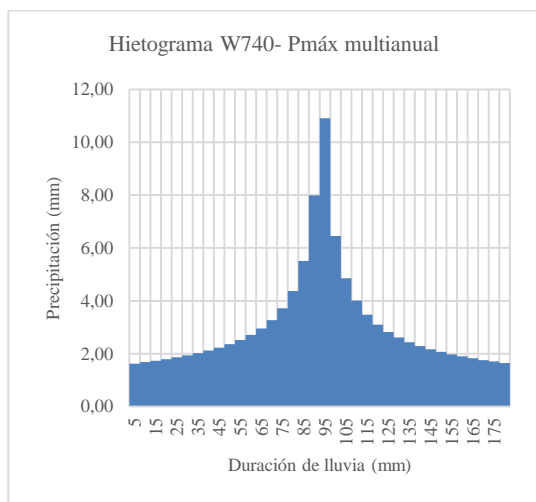


Gráfico 119. Hietograma de precipitación – W750.

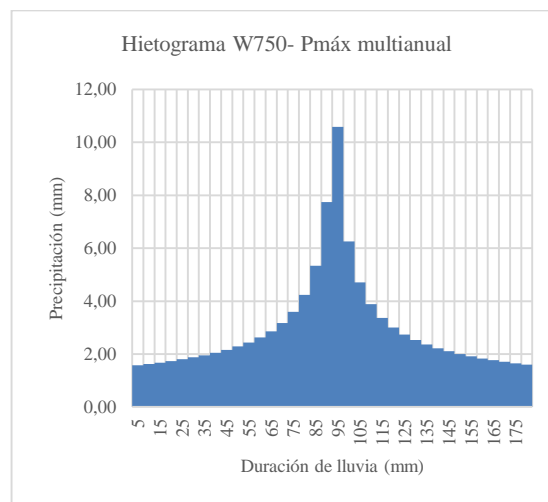


Gráfico 20. Hietograma de precipitación – W770.

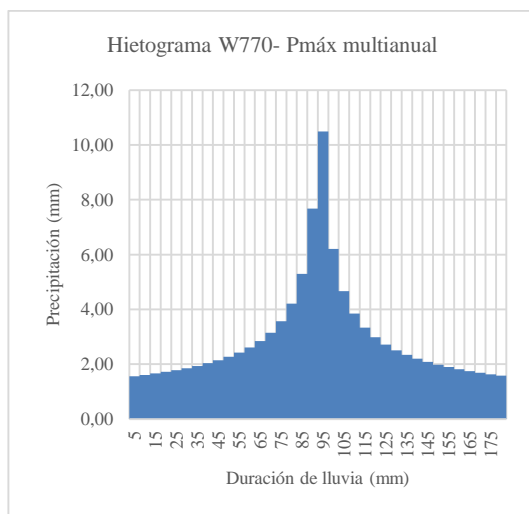


Gráfico 21. Hietograma de precipitación – W790.

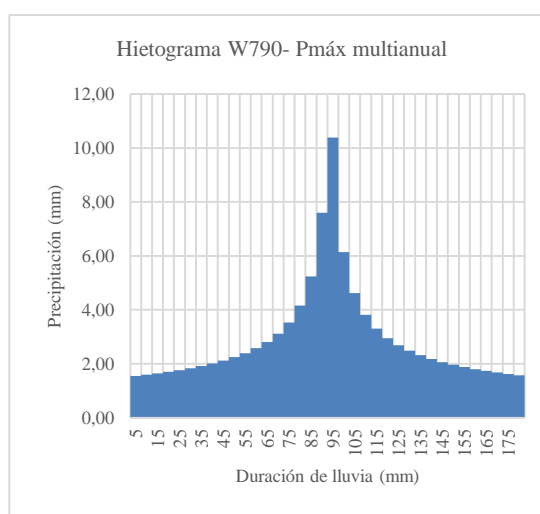


Gráfico 22. Hietograma de precipitación – W830.

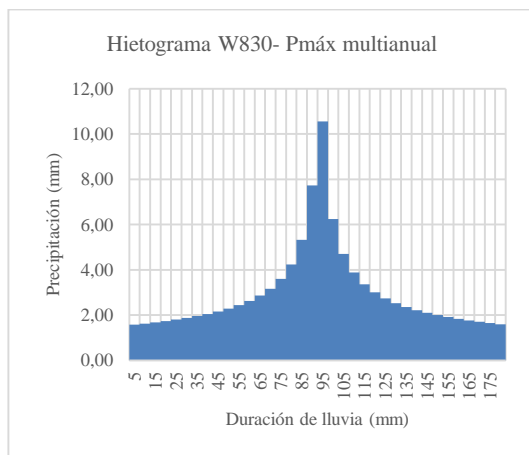
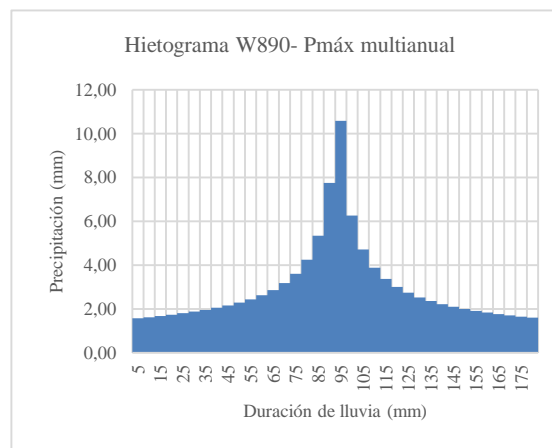


Gráfico 23. Hietograma de precipitación – W890.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Gráfico 24. Hietograma de precipitación – W900.

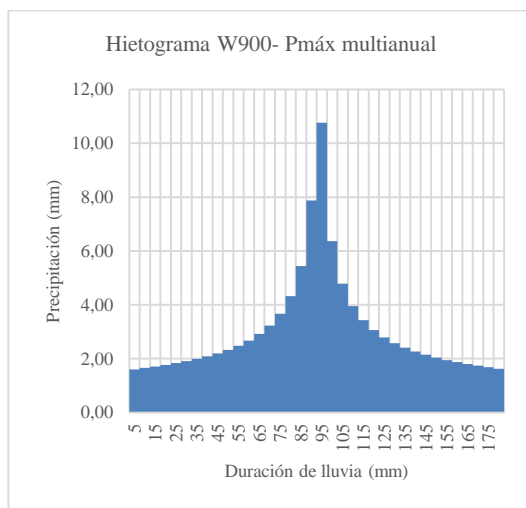


Gráfico 25. Hietograma de precipitación – W920.

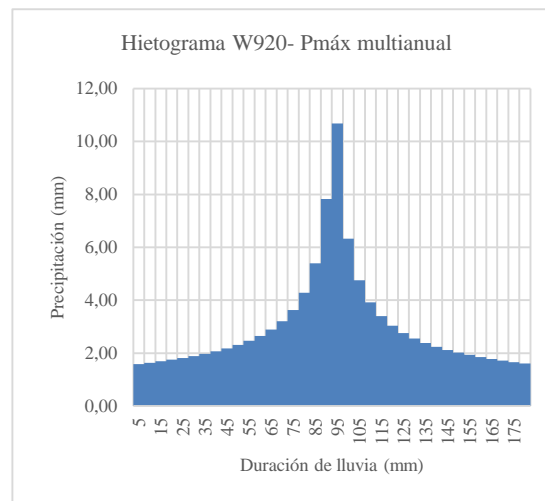


Gráfico 26. Hietograma de precipitación – W930.

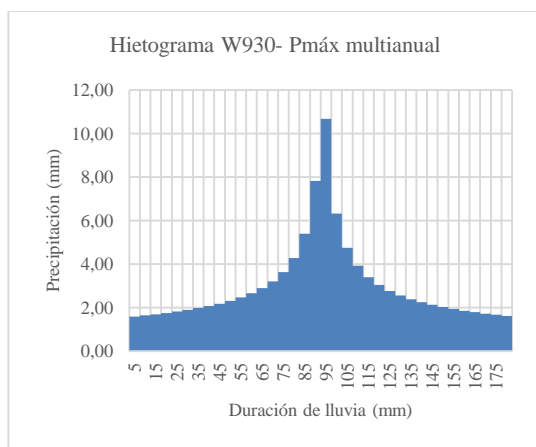
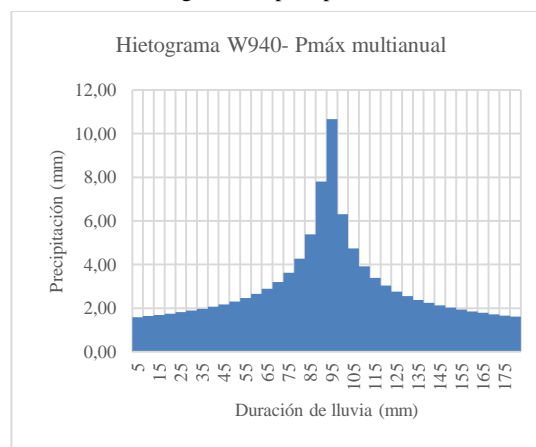


Gráfico 27. Hietograma de precipitación – W940.



Nota: Hietogramas calculados a partir de la media de precipitación obtenida por microcuenca en las Isoyetas de precipitación, fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 10. Hietogramas de precipitación para un periodo de retorno de veinticinco (25) años.

Gráfico 28. Hietograma Pr 25 años – W570.

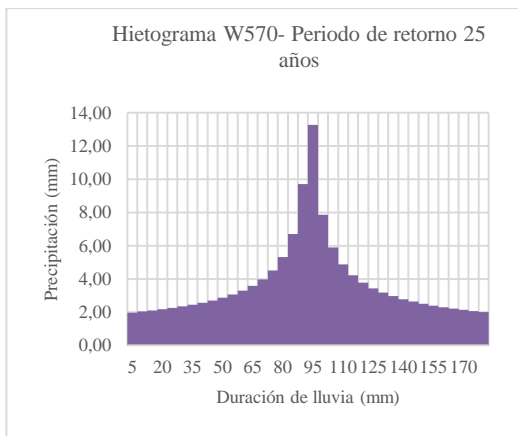


Gráfico 29. Hietograma Pr 25 años – W600.

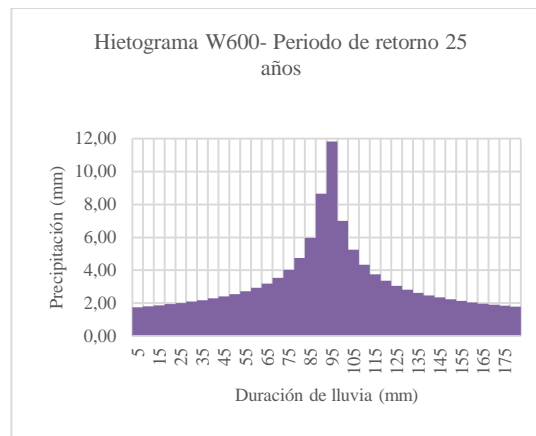


Gráfico 30. Hietograma Pr 25 años – W610.

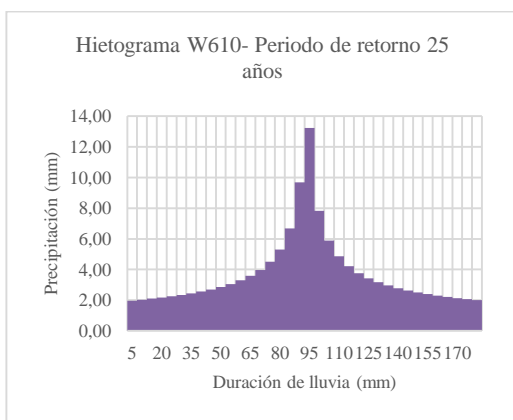


Gráfico 31. Hietograma Pr 5 años – W640.

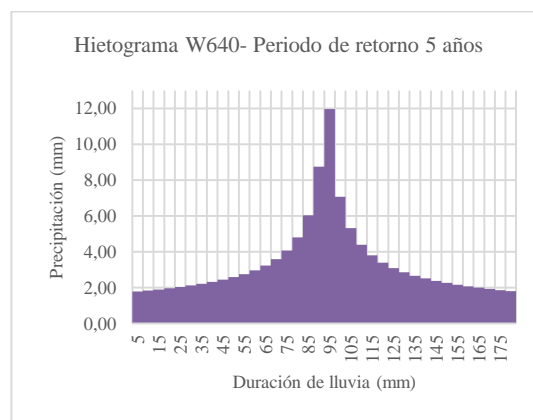


Gráfico 32. Hietograma Pr 25 años – W690.

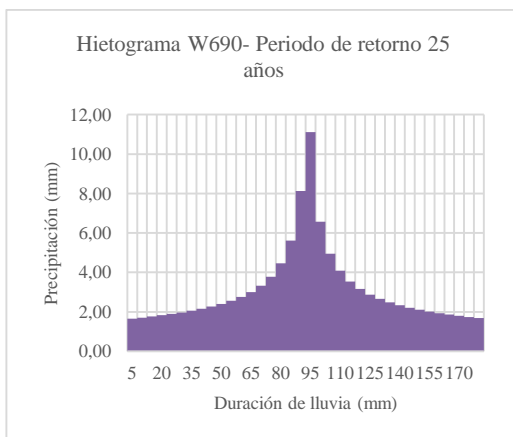
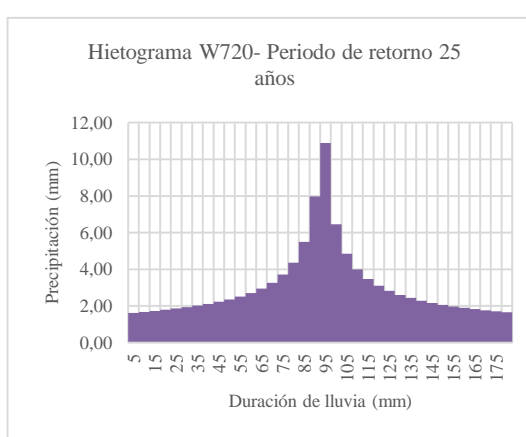


Gráfico 33. Hietograma Pr 25 años – W720.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Gráfico 34. Hietograma Pr 25 años – W740.

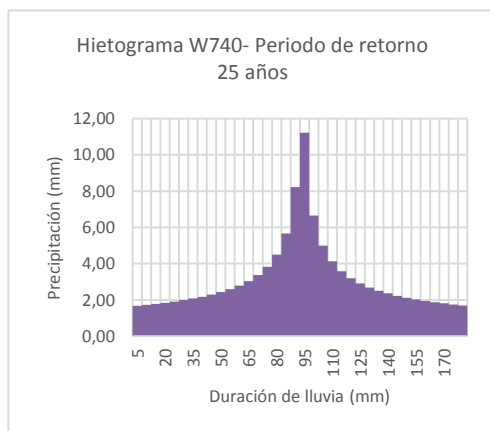


Gráfico 35. Hietograma Pr 25 años – W750.

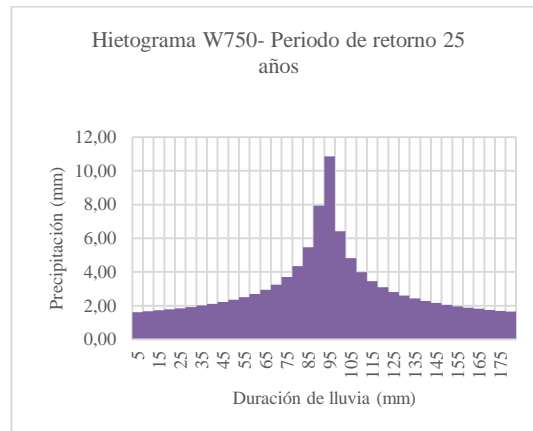


Gráfico 36. Hietograma Pr 25 años – W770.

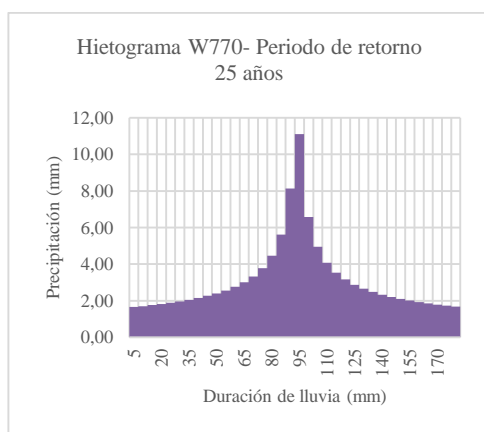


Gráfico 37. Hietograma Pr 25 años – W790.

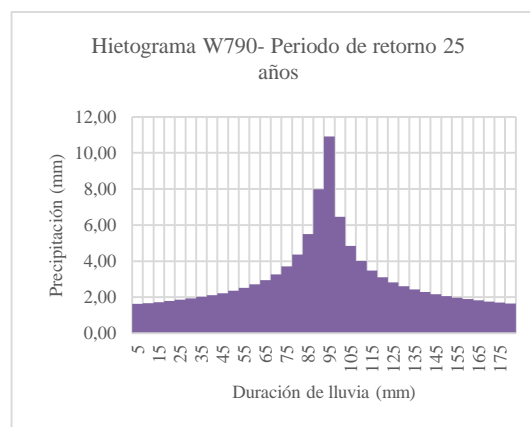


Gráfico 38. Hietograma Pr 25 años – W830.

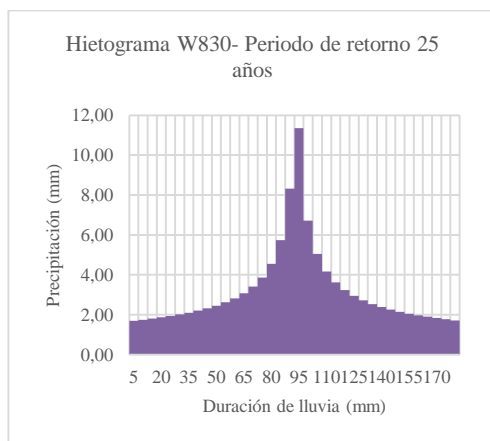
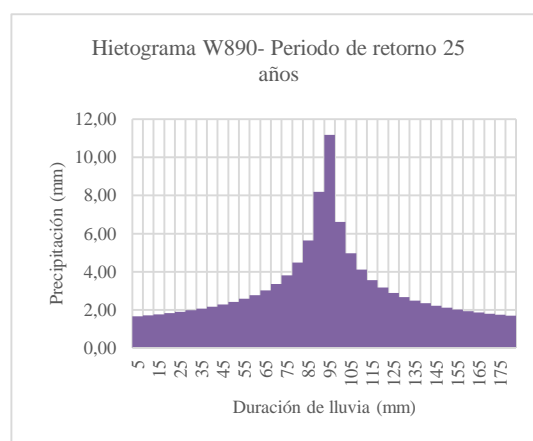


Gráfico 39. Hietograma Pr 25 años – W890.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Gráfico 40. Hietograma Pr 25 años – W900.

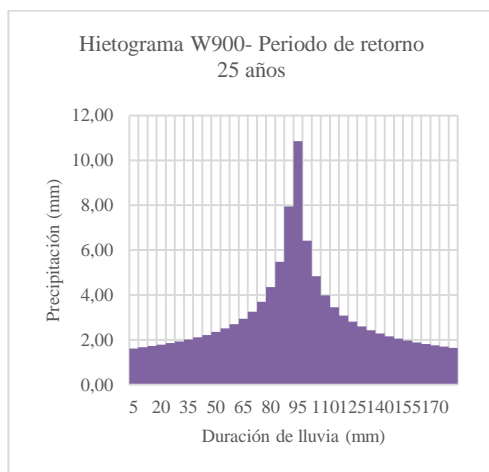


Gráfico 41. Hietograma Pr 25 años – W920.

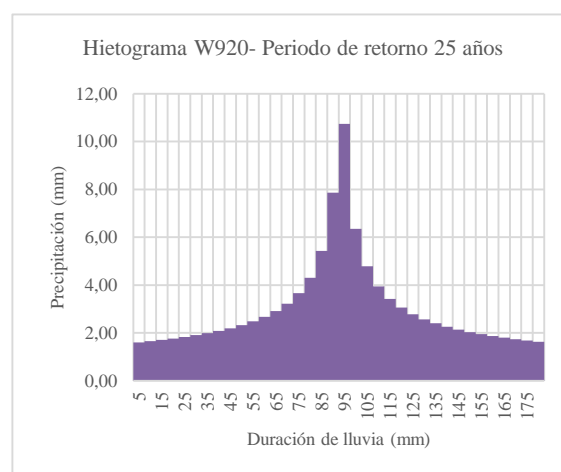


Gráfico 42. Hietograma Pr 25 años – W930.

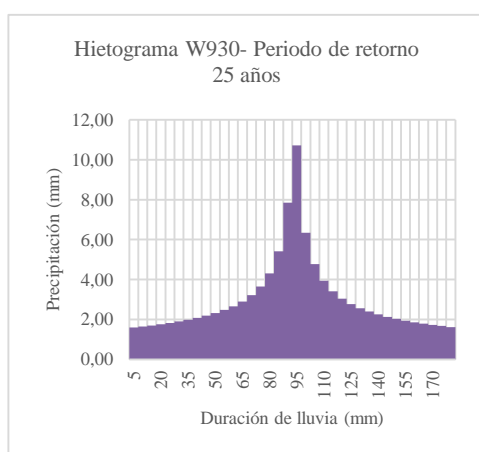
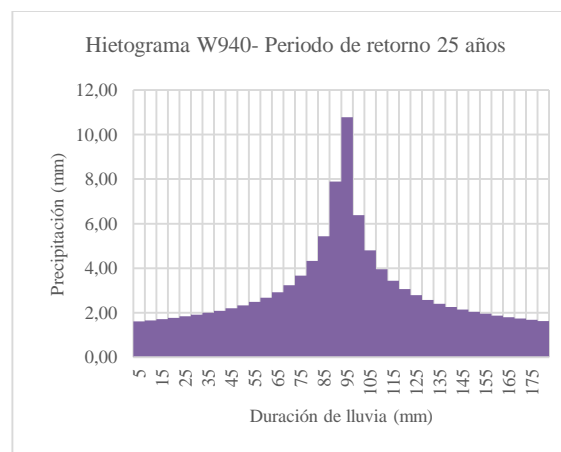


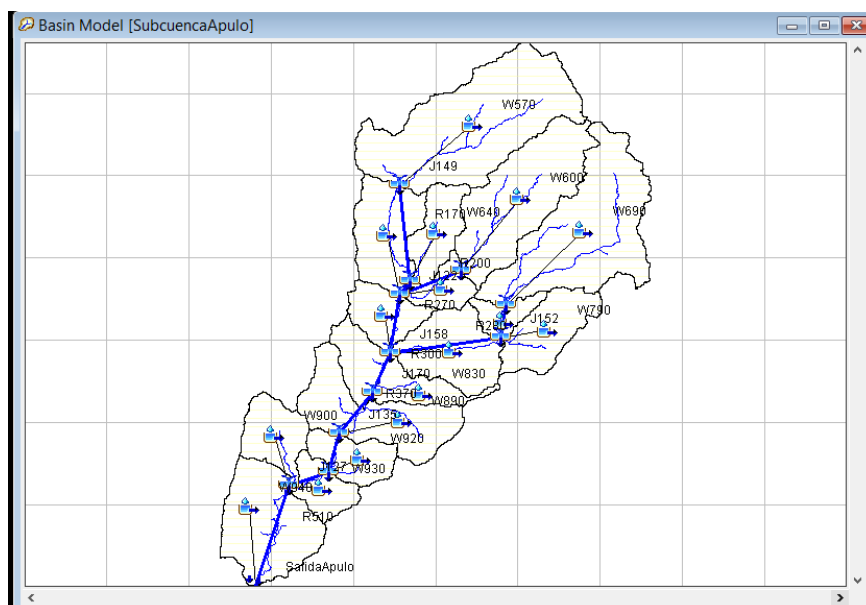
Gráfico 43. Hietograma Pr 25 años – W940.



Nota: Hietogramas calculados a partir de la proyección de la media de precipitación obtenida por microcuencia en las Isoyetas de precipitación para un periodo de retorno de 25 años, fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 11. Modelo cuenca, subcuenca Río Apulo - HEC HMS.



Nota: Modelo de cuenca ingresado al software HEC – HMS para la subcuenca del Río Apulo, fuente propia.

Anexo 12. Valores de curva número por microcuenca.

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
W770		54,4255	0,0
W740		52,7367	0,0
W720		68,877	0,0
W610		53,9475	0,0
W640		61,7122	0,0
W570		65,2148	0,0
W600		75,2587	0,0
W790		63,4415	0,0
W750		61,3918	0,0
W690		80,2274	0,0
W830		48,2729	0,0
W890		49,9174	0,0
W920		50,2811	0,0
W930		47,9295	0,0
W900		53,9581	0,0
W940		45,9692	0,0

Nota: Valores de curva numero ingresados al software HEC –HMS dentro de la etapa del modelo de cuenca, fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 13. Tiempos de retardo por microcuencas.

Subbasin	Graph Type	Lag Time (MIN)
W770	Standard	1,795
W740	Standard	1,407
W720	Standard	1,249
W610	Standard	1,863
W640	Standard	1,673
W570	Standard	2,426
W600	Standard	2,142
W790	Standard	1,517
W750	Standard	1,138
W690	Standard	2,717
W830	Standard	2,053
W890	Standard	2,325
W920	Standard	1,236
W930	Standard	1,557
W900	Standard	1,325
W940	Standard	1,980

Nota: Tiempos de retardo ingresados al software HEC –HMS dentro de la etapa del modelo de cuenca, fuente propia.

Anexo 14. Flujo base por microcuencas.

Subbasin	Initial Type	Initial Discharge (M3/S /M42)	Recession Constant	Threshold Type	Threshold Flow (M3/S)	Ratio to Peak
W770	Discharge	1,646	0,6	Threshold Discharge	1,646	
W740	Discharge	0,882	0,6	Threshold Discharge	0,882	
W720	Discharge	0,551	0,6	Threshold Discharge	0,551	
W610	Discharge	1,590	0,6	Threshold Discharge	1,590	
W640	Discharge	0,942	0,6	Threshold Discharge	0,942	
W570	Discharge	4,875	0,6	Threshold Discharge	4,875	
W600	Discharge	2,914	0,6	Threshold Discharge	2,914	
W790	Discharge	1,258	0,6	Threshold Discharge	1,258	
W750	Discharge	0,440	0,6	Threshold Discharge	0,440	
W690	Discharge	3,851	0,6	Threshold Discharge	3,851	
W830	Discharge	1,442	0,6	Threshold Discharge	1,442	
W890	Discharge	1,936	0,6	Threshold Discharge	1,936	
W920	Discharge	0,763	0,6	Threshold Discharge	0,763	
W930	Discharge	0,674	0,6	Threshold Discharge	0,674	
W900	Discharge	0,985	0,6	Threshold Discharge	0,985	
W940	Discharge	1,931	0,6	Threshold Discharge	1,931	

Nota: flujos base ingresados al software HEC –HMS dentro de la etapa del modelo de cuenca, fuente propia.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 15. Geometría de cauces por tramo.

Muskingum Cunge Routing [SubcuencaApulo]

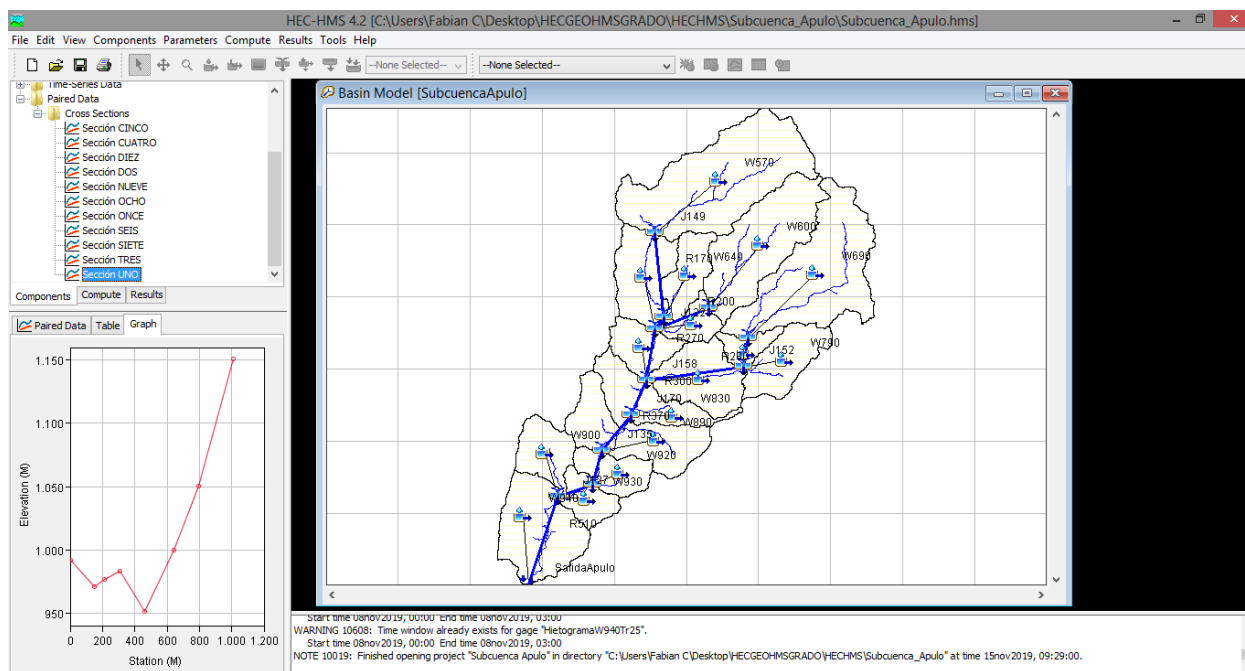
Show Elements: All Elements Sorting: Hydrologic

Reach	Time Step Method	Length (M)	Slope (M/M)	Manning's n	Invert (M)	Shape	Diameter (M)
R170	Automatic Fixed Inter...	7877,7	0,0298311	0,035		Eight Point	
R190	Automatic Fixed Inter...	1422,6	0,0224934	0,035		Eight Point	
R200	Automatic Fixed Inter...	5844,5	0,0607411	0,035		Eight Point	
R270	Automatic Fixed Inter...	4829,5	0,0236048	0,035		Eight Point	
R230	Automatic Fixed Inter...	2800,5	0,0371368	0,035		Eight Point	
R280	Automatic Fixed Inter...	8848,0	0,0305153	0,035		Eight Point	
R300	Automatic Fixed Inter...	1139,8	0,0140376	0,035		Eight Point	
R370	Automatic Fixed Inter...	2189,1	0,0105068	0,035		Eight Point	
R390	Automatic Fixed Inter...	3455,3	0,0078142	0,035		Eight Point	
R420	Automatic Fixed Inter...	3526,0	0,0082247	0,035		Eight Point	
R510	Automatic Fixed Inter...	4391,8	0,0082247	0,035		Eight Point	

Apply Close

Nota: Características de la geometría de cauces ingresados al software HEC –HMS dentro de la etapa del modelo de cuenca, fuente propia.

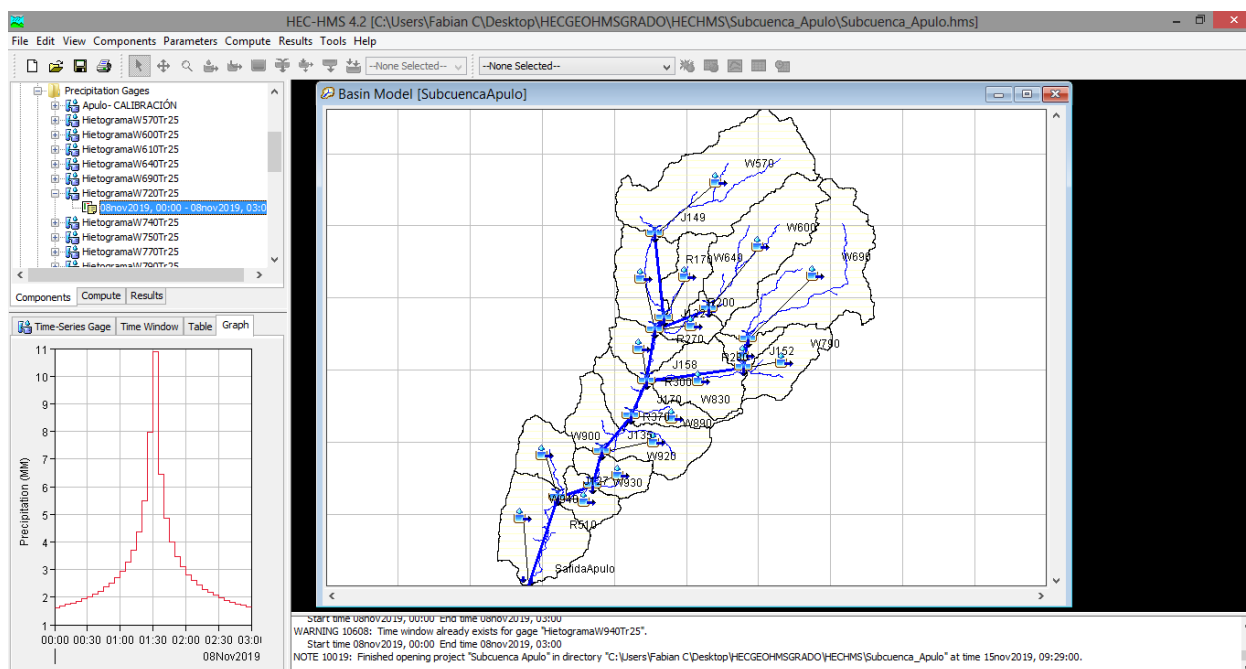
Anexo 16. Visualización secciones transversales por tramos.



Nota: Ingreso de secciones transversales, visualización en el software HEC –HMS dentro de la etapa del modelo de cuenca, fuente propia.

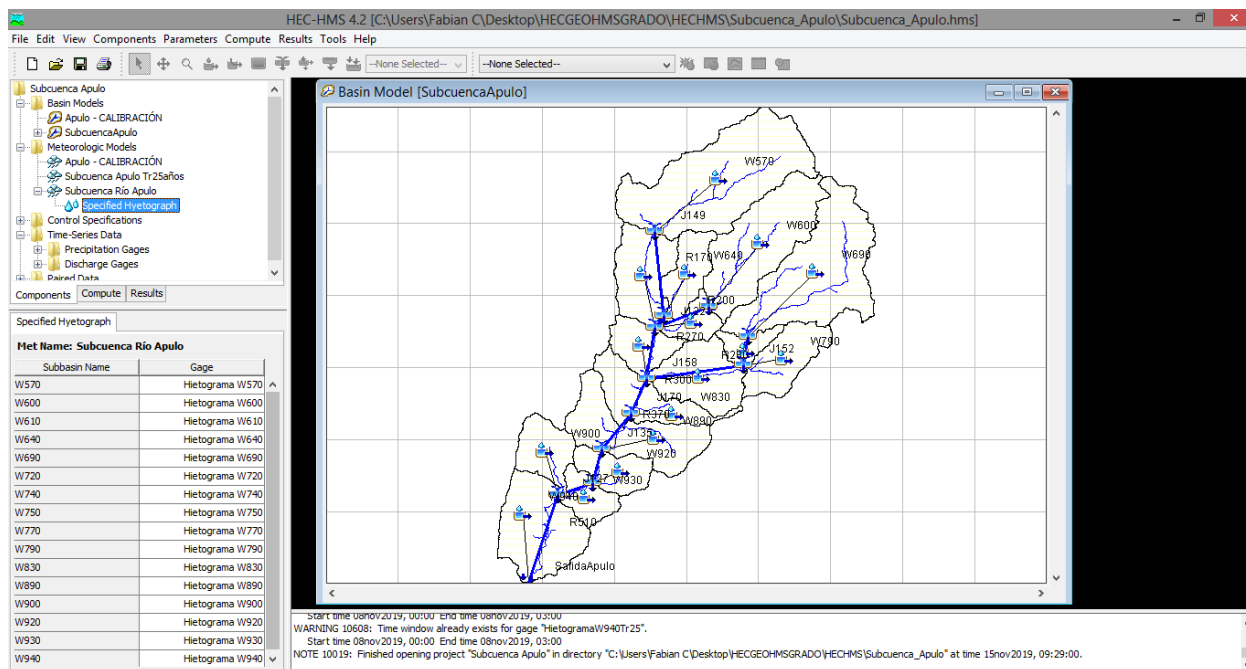
MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Anexo 17. Visualización hietogramas de precipitación por microcuenca.



Nota: Ingreso de hietogramas de precipitación, visualización en el software HEC –HMS dentro de la etapa del modelo de precipitación, fuente propia.

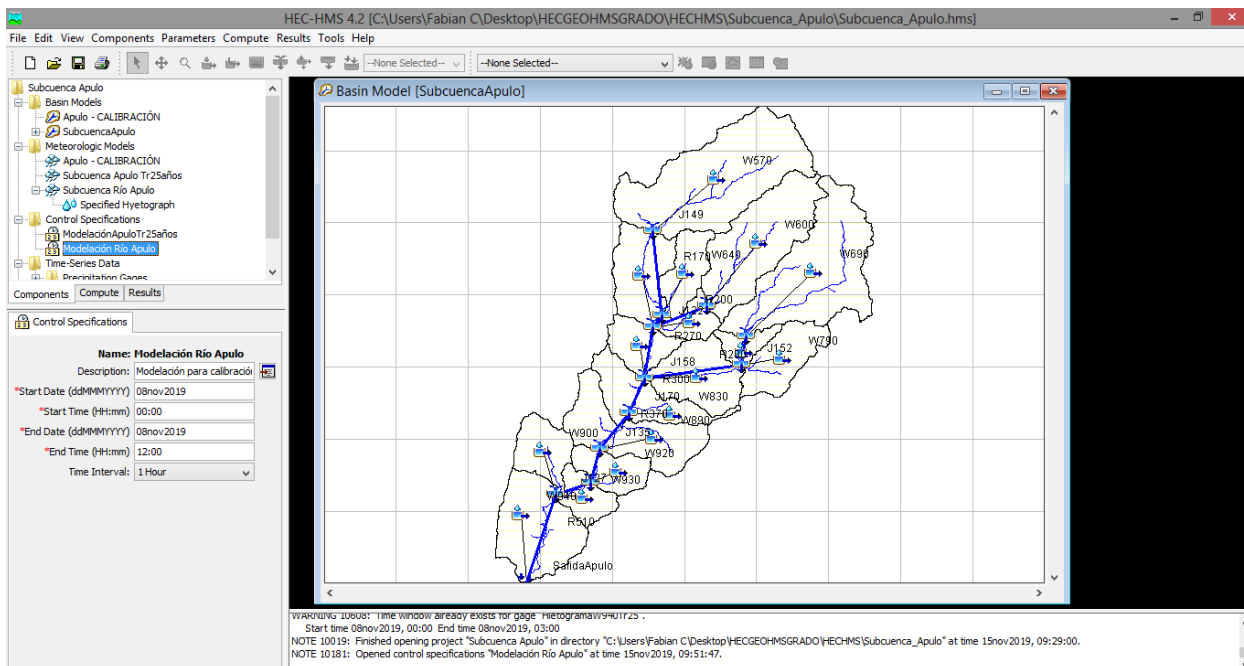
Anexo 18. Asociación de los hietogramas de precipitación a cada una de las microcuencas.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Nota: Asociación meteorológica de los hietogramas de precipitación por microcuenca, visualización en el software HEC –HMS dentro de la etapa del modelo meteorológico, fuente propia.

Anexo 19. Descripción de las especificaciones de control.



Nota: Descripción de las especificaciones de control, visualización en el software HEC –HMS dentro de la etapa del modelo de control, fuente propia.